

PLAN BILAN TOSCA

Rappel (tiré du CR dernier bureau TOSCA) : Le bilan doit permettre de faire une auto-évaluation du TOSCA et doit aider à définir la prospective. Il doit permettre de répondre aux questions suivantes : Qu'est-ce qui a été fait par rapport à ce qui a été annoncé ? Qu'est-ce qui n'a pas été fait et pourquoi (problèmes techniques, de programmation, de moyens...) ? Est-ce que la prospective a été utile ? Est-ce que les recommandations effectuées dans la prospective ont été suivies d'effets par le CNES ?

4-TERRE SOLIDE: VERS UNE IMAGE 4D DE LA TERRE SOLIDE

4-A INTRODUCTION

1-Périmètre

2-Enjeux 2009

3-Priorités du séminaire de Biarritz 2009 (rappel)

4-B LES AVANCEES SCIENTIFIQUES

4-B-1 MODELES STATIQUES / IMAGES DE LA TERRE

Structure de l'ionosphère

Champ magnétique terrestre : caractérisation et modélisation

Champ de gravité terrestre : caractérisation et modélisation

Système de référence terrestre

Topographie / Bathymétrie

Lithosphère

Manteau

4-B-2 EVOLUTION TEMPORELLE DU SYSTEME TERRE

Dynamique de la thermosphère & de l'ionosphère

Dynamique de la lithosphère et cycle sismique

Par l'étude de la propagation ionosphérique

Par l'étude des déformations de surface et des variations de gravité

Dynamique de la lithosphère et surcharges

Dynamique du noyau

4-C MISSIONS EN COURS ET AVANCEMENT DES MISSIONS

4-D STRUCTURATION DE LA COMMUNAUTE ET POSITIONNEMENT INTERNATIONAL

4-E CONCLUSION

4-TERRE SOLIDE: VERS UNE IMAGE 4D DE LA TERRE SOLIDE

4-A INTRODUCTION

Le périmètre d'étude du groupe Terre Solide couvre la géophysique interne, la géodynamique, la géodésie, ainsi que les impacts de la dynamique de la Terre Solide sur les enveloppes externes. Les échelles temporelles et spatiales caractéristiques des processus à l'origine de la dynamique de la Terre Solide varient sur plusieurs ordres de magnitudes : temporellement depuis la seconde (séismes) aux millions d'années (tectonique des plaques) et spatialement du centimètre (faille) à la dizaine de milliers de kilomètres (dorsales médio océaniques, Fig 1).

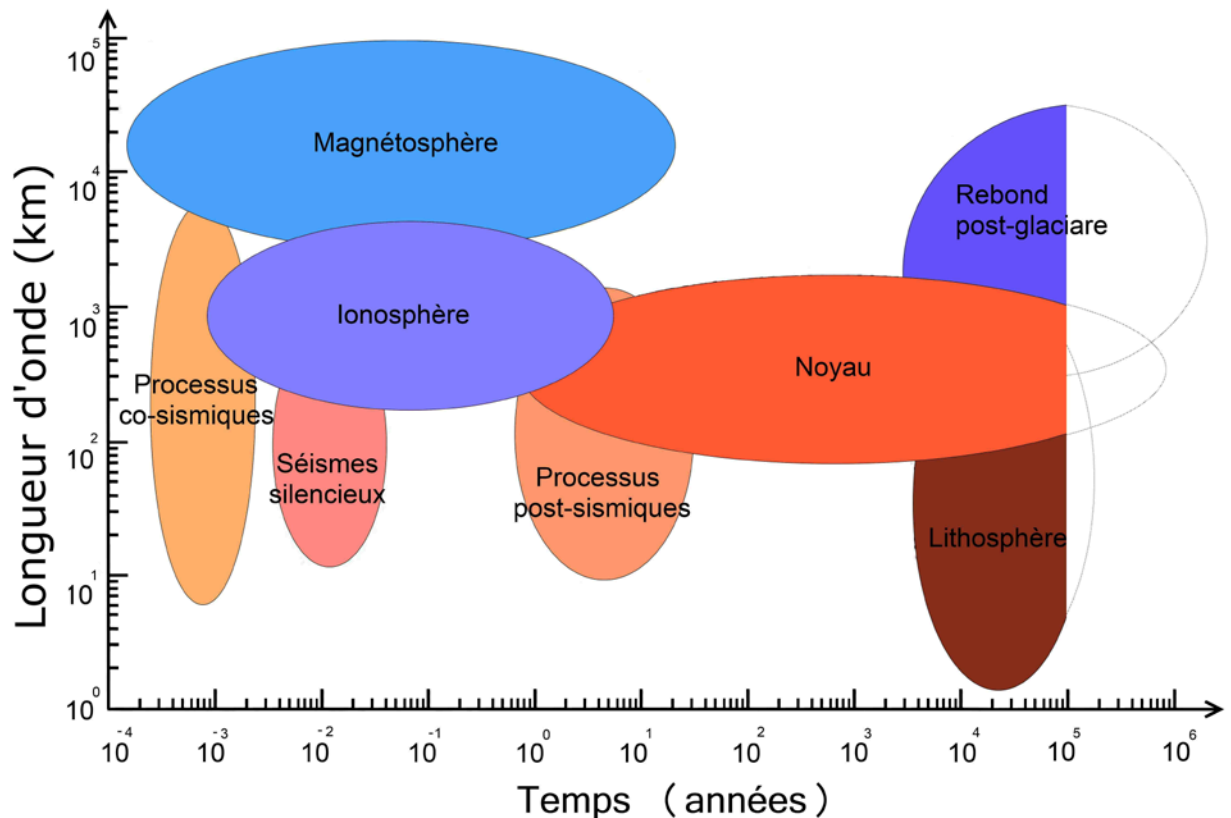


Figure 1 : Echelles spatiales et temporelles des principaux processus géodynamiques

Les missions spatiales sont au cœur de l'amélioration de la connaissance à la fois sur un plan statique ou dynamique du système Terre, car elles fournissent :

- des mesures géophysiques complémentaires des mesures acquises au sol ou par avion (topographie, bathymétrie, gravimétrie, magnétisme...) pour une meilleure caractérisation **statique** du système Terre;
- des observations continues (magnétisme, gravimétrie, géodésie, imagerie de surface) pérennes, complémentaires de celles obtenues in situ, afin de suivre la **dynamique** du système Terre.

L'importance des mesures satellitaires pour l'étude des phénomènes clés dans le domaine de la Terre Solide avait ainsi été soulignée lors du séminaire de prospective de Biarritz. Les priorités à court terme

qui s'étaient dégagées étaient la préparation de la mission Swarm et l'exploitation des missions Grace et GOCE pour mesurer le champ magnétique et le champ de gravité avec une précision de mesure jusqu'à inégalée. Une autre priorité portait sur la nécessité d'approfondir l'étude sur les déformations de surface à l'aide de l'imagerie spatiale (optique et radar), car des avancées technologiques ouvrent de nouvelles perspectives dans ce domaine améliorant la couverture globale et la résolution temporelle. Un autre volet soutenu par le groupe Terre Solide concernait la mesure des variations du contenu total en électrons suite à un séisme pour estimer l'apport quantitatif de ce type de mesures, une recommandation étant de faciliter l'accès aux données DEMETER ou le développement d'un capteur expérimental approprié. Le groupe Terre Solide avait également souligné la nécessité de structuration de la communauté scientifique nationale, en particulier autour de deux thèmes, la gravimétrie/géodésie et les déformations du sol, pour généraliser l'utilisation des produits issus du spatial dans le domaine scientifique.

4-B LES AVANCEES SCIENTIFIQUES

4-B-1 MODELES STATIQUES / IMAGES DE LA TERRE

Structure de l'ionosphère

Les données du satellite DEMETER situé sur une orbite à 700km ont permis d'établir un diagnostic approfondi du plasma in-situ et ont amené des avancées importantes sur la physique de l'ionosphère, et de ses couplages avec la mésosphère et la stratosphère. Il était difficile jusqu'alors de répondre à ces questions en raison d'une gamme d'altitude (30-90 km) trop élevée pour les mesures ballons mais trop basses pour les mesures satellites. La modélisation de la thermosphère est une thématique fondamentale notamment dans le cadre de la prédiction des trajectoires des satellites et sondes artificielles, aussi bien au niveau de la Terre que des autres planètes telluriques. L'analyse des données de densité thermosphérique déduites des mesures *CHAMP*, *GRACE* et *GOCE* et des résultats de modélisation ont permis d'identifier les grandes causes de la variabilité de la thermosphère terrestre sur diverses échelles de temps : à court terme (orages géomagnétiques), à moyen terme (variations saisonnières) et à long terme (variations suivant le cycle solaire).

Champ magnétique terrestre : cartographie et modélisation

Le champ magnétique terrestre résulte de la superposition de sources magnétiques d'origines variées, localisées dans le noyau externe, dans la croûte (ou plus généralement la lithosphère), et entre 100 km d'altitude et plusieurs rayons terrestres pour les sources ionosphériques et magnétosphériques externes à la surface de la Terre. La distribution géographique de ces sources ainsi que la physique qui les anime ne sont pas non plus homogènes. Le problème scientifique majeur, et toujours d'actualité, est de séparer les contributions. L'objectif scientifique de la mission Swarm (lancée avec succès en novembre 2013) est précisément d'apporter une information globale et de haute précision sur le champ géomagnétique terrestre et son évolution dans le temps. Les données permettront d'améliorer notre connaissance du système terrestre en apportant un nouvel éclairage sur sa dynamique interne.

Champ de gravité terrestre : cartographie et modélisation

Cette dernière décennie a été marquée par le lancement, par différentes agences spatiales, des premières missions satellitaires dédiées à la mesure du champ de gravité : la mission CHAMP (GFZ/DLR) en 2000, la mission GRACE (NASA/DLR) en 2002 et enfin la mission GOCE (ESA) en 2009. Ces trois missions, par leurs caractéristiques complémentaires, ont révolutionné notre connaissance des variations de la pesanteur à l'échelle globale. Elles ont d'abord permis d'améliorer significativement les modèles de champ statique (géoïde, champ de gravité) en fournissant une information précise et homogène sur l'ensemble du spectre des variations de gravité jusqu'à des degrés et ordres élevés (240

attendu pour GOCE). Cette dernière mission a permis d'obtenir pour la première fois grâce à des mesures gradiométriques 3D, des observations directes des différentes composantes du tenseur gradient du champ de gravité. La mission GRACE quant à elle fournit depuis plus de 10 ans une information unique sur les variations temporelles de gravité à grande échelle associées à des redistributions de masse au voisinage ou à l'intérieur de la Terre.

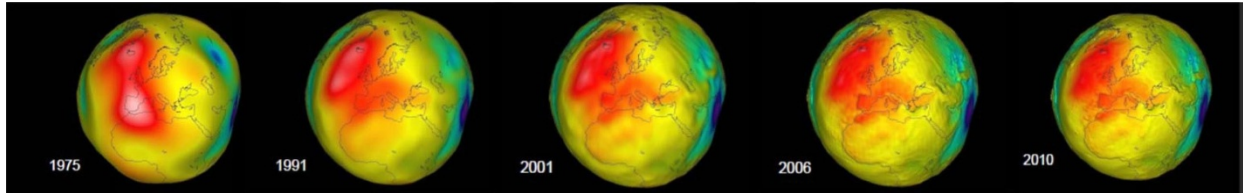


Figure 2 : Evolution de la précision de détermination du géoïde par les techniques spatiales

Ces différentes missions ont eu un impact majeur pour la connaissance de la Terre solide et ses enveloppes fluides, dont les études intègrent de plus en plus l'observation gravimétrique. Elles ont permis de préciser les longues et moyennes longueurs d'onde du champ de pesanteur (jusqu'à 100 km), utiles dans de nombreuses applications pour la structure interne du globe, pour l'étude de la circulation océanique ou encore pour la connaissance du géoïde terrestre (précision des derniers modèles GOCE de l'ordre de de 2 à 3 cm à 100 km de résolution). Ces données gravimétriques spatiales, combinées à des données issues de l'altimétrie satellitaire ou encore à des mesures gravimétriques issues de campagnes terrestres, marines ou aéroportées, comme celles archivées par le Bureau Gravimétrique International (BGI), permettent d'obtenir des modèles globaux jusqu'à des résolutions ultimes de 5' (~12 km) comme pour le modèle EGM08. De nouveaux développements théoriques ont en outre permis de calculer pour la première fois à l'échelle globale les anomalies gravimétriques intégrant un modèle de Terre réaliste (prise en compte des masses liées à la topographie, aux océans, lacs et calottes glaciaires..) et reflétant les hétérogénéités de densité à l'intérieur du globe. Ces différents modèles à haute résolution sont particulièrement utiles à l'étude de la structure interne du globe à différentes échelles (lithosphère, croute terrestre) ainsi que pour l'étude des risques naturels ou encore l'inventaire de ressources minières.

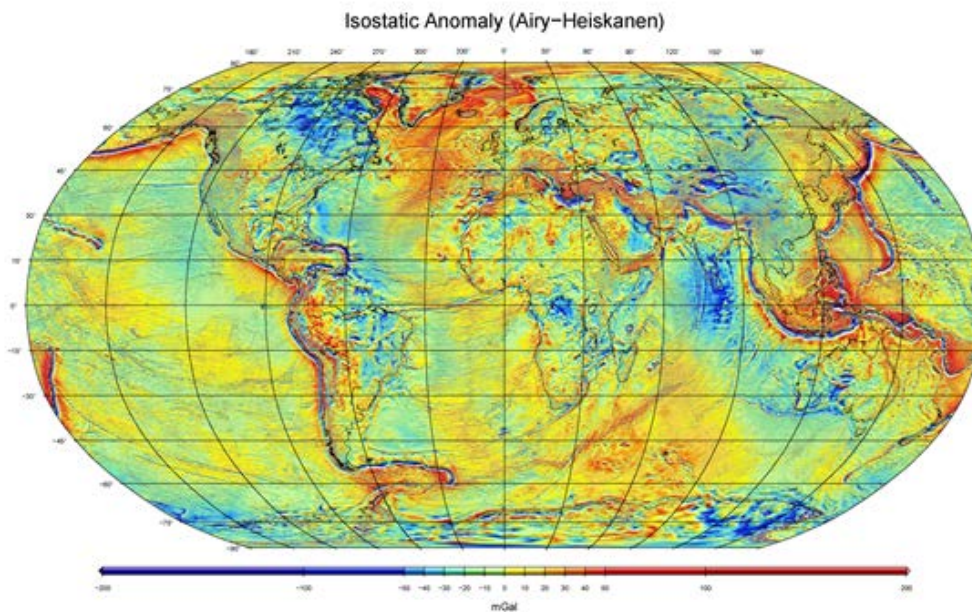


Figure 3 : Anomalies isostatiques globales calculées en symétrie sphérique
(Bonvalot et al., 2012 ; Balmino et al., 2012)

Ces progrès entraînent aussi aujourd'hui de nouvelles réflexions sur les futures missions spatiales à mettre en œuvre pour assurer une continuité et une diversité des observations à acquérir. Le CNES/TOSCA a ainsi soutenu plusieurs projets dans ce domaine, à la fois pour l'exploitation des missions GRACE et GOCE qui ont permis le développement et la mise à disposition de nouveaux modèles de champs mais également pour l'évaluation et la simulation de nouvelles missions spatiales, l'une pour l'altimétrie haute résolution, l'autre pour une mission de poursuite de la mission GRACE, dont la fin est programmée pour 2014.

Systeme de référence terrestre

La connaissance précise d'un repère de référence géodésique terrestre est cruciale pour de très nombreuses applications en Sciences de la Terre (niveau moyen des mers, mouvements tectoniques, validation de modèles de référence, etc.). Une précision de l'ordre de 1 mm en position et 0.1 mm/an en vitesse est nécessaire pour étudier, avec précision et dans la durée, des phénomènes affectant la Terre Solide. Des combinaisons intégrant un nombre croissant d'observations géodésiques spatiales complémentaires (GNSS, VLBI, SLR, DORIS) permettent de mettre à jour régulièrement le repère de référence (ITRF - International Terrestrial Reference Frame). Un résultat marquant sur la période est donc la publication en 2010 de la nouvelle réalisation de ce système (ITRF2008) pour laquelle le gain en précision, tant en position qu'en vitesse, est significatif. Différentes améliorations de traitements et des méthodes d'évaluation de l'origine et de l'échelle de ce repère ont été proposées à cette occasion.

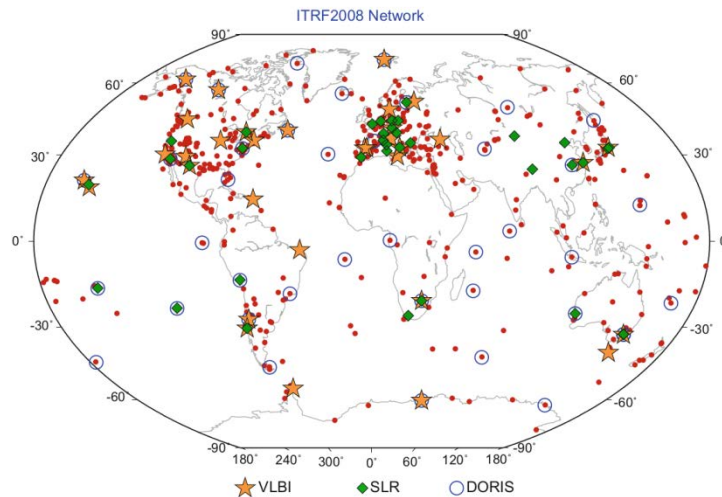


Figure 4 : Réseau ITRF2008, les points rouges représentent les stations GPS (Altamimi et al., 2011)

Topographie / Bathymétrie

Dans la plupart des études en Terre Solide, le Modèle Numérique de Terrain (MNT, représentation numérique de la topographie) est supposé constant. Sur les terres émergées, il est généralement extrait de topographies quasi globales disponibles gratuitement comme SRTM et ASTER GDEM ou, plus rarement, à partir de couples stéréo d'images SPOT5 (accessible à la communauté via le programme CNES-ISIS). Sur plusieurs projets soutenus par le TOSCA, le MNT a constitué une donnée clef de l'étude. C'est le cas par exemple en morpho-tectonique, domaine où il permet d'extraire des paramètres comme l'hypsométrie des bassins hydrologiques, indicateur de la maturité du relief ou l'altitude de terrasses marines afin de déduire les vitesses de soulèvement des chaînes de montagne. Mais le plus

souvent le MNT est une donnée « secondaire », mais essentielle, permettant l'intégration de données de télédétection d'origines diverses dans des Systèmes d'Information Géographique (e.g., simple orthorectification d'imagerie optique ou radar) ou l'extraction de paramètres géophysiques avec une plus grande précision (e.g., modélisation/correction des franges topographiques en interférométrie radar pour suivre les déformations de la surface du sol). Depuis une décennie la communauté française exprime son besoin d'un MNT mondial de précision décimétrique, initialement via le projet de roue interférométrique. Depuis 2009, la communauté s'est structurée pour proposer une autre mission, Z-Earth, qui outre l'amélioration de la topographie des terres émergées inclut une composante dynamique afin d'observer, entre autres, la signature topographique des séismes, des éruptions volcaniques ou des glissements de terrain. Le TOSCA a accompagné cette structuration contribuant à l'amélioration de la définition des besoins et des solutions techniques proposées.

Pour la partie immergée, la bathymétrie hauturière peut être dérivée de mesures fines du champ de pesanteur. Ces nouvelles mesures, conjuguées à des données bathymétriques existantes, ont permis en identifiant de nouvelles structures d'améliorer la connaissance géodynamique régionale de plusieurs zones du globe. Cette bathymétrie a également contribué dans la zone du Pacifique, peu couverte en levés hydrographiques, aux projets de délimitation des eaux territoriales (projet EXTRAPLAC pour la France). La taille minimale des structures qui peuvent être mesurées est de l'ordre de la trentaine de kilomètres. Les nouveaux traitements de l'altimétrie satellitaire (retracking des missions anciennes) ont permis d'obtenir cette bathymétrie de mieux en mieux résolue. De nouveaux projets de missions satellitaires, avec des altimètres conventionnels et une constellation de satellites ont été élaborés aux USA (projet ABYSS-Lite) ou en France (projet de mission GRAAL) pour améliorer la résolution spatiale. C'est désormais le projet phare NASA-CNES relatif au Satellite à large fauchée SWOT qui rassemble la communauté pour l'amélioration de la résolution spatiale et de la précision des mesures altimétriques. Il sera possible à partir des données altimétriques de cette mission et en passant par les grandeurs gravimétrique classique (pente le long des traces ou hauteur moyenne de l'océan) d'estimer une bathymétrie globale optimale (10 à 15 km de résolution). Cette mission ambitieuse représentera un saut technologique important dans l'altimétrie satellitaire. Des études sont actuellement en cours pour évaluer l'apport de cette mission pour la connaissance bathymétrique. Cependant, pour la partie littorale, critique pour de nombreuses applications (suivi du trait de côte, érosion des plages, transferts Terre / Mer), cette approche n'est pas adaptée et des méthodes complémentaires doivent être appliquées. Sur la période 2009-2013 se sont développées plusieurs techniques prometteuses de restitution fine de la bathymétrie par Lidar Bathymétrique et par imagerie hyperspectrale. Le TOSCA soutient une étude visant à évaluer le potentiel du lidar Bathymétrique non seulement pour la mesure bathymétrique mais également pour l'évaluation du contenu de la colonne d'eau.

Lithosphère - Les missions Oersted et CHAMP ont permis une amélioration spectaculaire de notre connaissance du champ magnétique d'origine lithosphérique. S'appuyant sur la modélisation du champ magnétosphérique mise au point au cours du développement du modèle global CM4, les chercheurs ont ainsi mieux isolé le champ lithosphérique. Il y a maintenant accord entre les modèles les plus précis et les plus récents (CHAOS4, GRIMM3 et MF7) jusqu'au degré harmonique 70. En parallèle, des travaux théoriques ont clarifié le lien entre la distribution du vecteur aimantation de la lithosphère et le champ magnétique mesuré par les satellites. Le problème inverse, consistant à cartographier la source à partir du champ mesuré, est très mal posé et il n'y a pas de correspondance exacte entre champ mesuré en un point et aimantation à sa verticale.

L'avenir est donc aux modèles globaux fondés sur des *a priori* géologiques et incluant dans le problème direct toutes les sources de champ. Par exemple, le lien entre température et aimantation pourra être mis à profit pour cartographier le flux de chaleur sous la glace (Antarctique, Groenland) et contraindre ainsi

les modèles d'évolution des calottes glaciaires. De grands progrès sont attendus de la mission Swarm. Les deux satellites en orbite basse traverseront, lorsqu'ils seront voisins, le même champ externe et la différence des champs magnétiques mesurés devra être attribuée principalement à des sources lithosphériques. Parce que la première difficulté dans le calcul des anomalies lithosphériques fût l'analyse orbite par orbite des mesures magnétiques, la mission Swarm serait considérablement améliorée par l'adjonction d'un quatrième satellite sur une orbite équatoriale (comme proposé dans deux projets distincts chinois et français).

Manteau : Tomographie électrique. Ces dernières années, le calcul rigoureux de l'induction dans les océans a ouvert la voie à une tomographie électromagnétique 3D du manteau et en particulier de la zone de transition entre 400 et 700 km de profondeur. Si des profils 1D de conductivité électrique ont déjà été obtenus à partir de données satellitaires, les premiers essais de tomographie 3D globale ont utilisé uniquement des données d'observatoires in situ. En prévision de la mission Swarm, des algorithmes ont cependant été développés pour des données satellitaires. Les premiers modèles tomographiques ont été interprétés en terme de température, de contenu en hydrogène et en dioxyde de carbone (jusqu'à 300 km de profondeur) et de fusion partielle. La tomographie électromagnétique permet un regard entièrement nouveau sur la pétrographie et la physique du manteau. Il devrait être possible d'utiliser de façon conjointe des données issues de magnétomètres placés à bord des satellites Swarm, dans des observatoires ou au fond de la mer. Cela permettrait d'utiliser comme source inductrice les courants électriques responsables de la variation diurne du champ magnétique et d'imager le manteau supérieur. On cherchera aussi à mettre en évidence d'éventuelles anisotropies de conductivité associées à des mouvements passés ou présents à l'intérieur du manteau. Dans un autre ordre d'idée, les progrès réalisés dans la compréhension de la dynamique à l'intérieur du noyau permettent d'envisager de coupler des modèles du noyau et du manteau via l'induction dans le manteau profond.

4-B-2 EVOLUTION TEMPORELLE DU SYSTEME TERRE

Dynamique de la thermosphère et de l'ionosphère - Le satellite DEMETER a permis d'obtenir des résultats scientifiques nouveaux sur les propriétés du milieu ionosphérique et sur des sources de perturbations peu étudiées jusqu'ici, telles que les perturbations anthropogéniques (émetteurs VLF, HF), les émissions électromagnétiques engendrées par les éclairs d'orages ainsi que les événements transitoires lumineux observés au dessus des orages atmosphériques.

Il devient également critique de déterminer de nouveaux indices magnétiques avec de meilleures résolutions temporelle ou spatiale. De telles activités de recherche sont actuellement porteuses internationalement. Une équipe de recherche française, bénéficiant des atouts du Service International des Indices Magnétiques (SIIG) dirigé par le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales), étudie actuellement l'intérêt d'indices globaux avec une résolution inférieure à 3h et d'indices sectoriels pour suivre l'activité magnétique associée à l'interaction directe entre la magnétosphère et le vent solaire côté jour ou associées aux perturbations de la queue magnétosphérique côté nuit. Ces indices pourraient être utiles pour contraindre certains modèles de thermosphère ou d'ionosphère.

Certains réseaux locaux de stations magnétiques permettent également de caractériser certaines sources de courants externes. C'est le cas du mini-réseau WAMNET (« West African Magnetometer Network ») opéré par l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) en partenariat avec d'autres institutions africaines. WAMNET a pour but de suivre l'évolution temporelle de l'électrojet équatorial. Les objectifs scientifiques sont ainsi de suivre l'état de l'ionosphère équatoriale (dérive verticale du plasma, champ électrique) à partir d'enregistrements géomagnétiques au sol (en temps quasi-réel dans certaines

stations) et de développer de nouveaux outils de validation des produits de données ionosphériques de niveau 2 de la mission satellitaire Swarm de l'ESA.

Ces nouveaux indices, ainsi que ces réseaux de magnétomètres au sol, sont importants pour modéliser le champ géomagnétique à partir des données spatiales (Oersted, CHAMP, SAC-C) ou futures (Swarm ou la future mission chinoise CGS) aussi bien dans le cadre de la Météorologie de l'Espace que pour une meilleure modélisation du champ magnétique interne de la Terre.

Dynamique de la lithosphère et cycle sismique - La compréhension de la dynamique de la lithosphère en réponse au cycle sismique est un enjeu fondamental en Sciences de la Terre. A partir de mesures directes ou indirectes des déformations de la surface terrestre lors des différentes phases (inter, co et post) des séismes, l'objectif est de comprendre le cycle sismique dans sa globalité. Ces mesures, largement basées sur les données satellitaires, observent le signal associé aux séismes soit dans l'ionosphère soit directement à la surface du globe (déformation de surface ou du géoïde).

Par l'étude de la propagation ionosphérique

L'un des objectifs de la mission DEMETER était de prouver l'existence de signaux électromagnétiques précédant les séismes. De nombreuses études statistiques ont été menées pour tenter de détecter ces signaux précurseurs dans l'ionosphère à l'aide de DEMETER et ces résultats nécessiteront d'être validés par d'autres études indépendantes. De tels signaux précurseurs de séismes dans l'ionosphère ont également été recherchés à partir de mesures de contenu électronique total (ou TEC) par mesures GPS, les résultats montrent que les effets observés avant les séismes sont manifestement liés à l'activité magnétosphérique même en période de minimum solaire. Enfin, des signaux précurseurs d'éruptions volcaniques ont également été recherchés à l'aide des données DEMETER. Certaines études montrent des modifications de l'ionosphère avant certaines éruptions et certains séismes, mais les résultats nécessitent d'être confirmés sur une base d'observations plus grande et en contraignant mieux les possibles effets de l'activité magnétosphérique. Même si la mission DEMETER s'est arrêtée en 2010, sa base de données continuera certainement dans le futur à être exploitée pour rechercher de tels signaux précurseurs (séismes ou éruptions volcaniques).

D'un autre côté, les vibrations produites à la surface de la Terre lors des séismes, des tsunamis ou des éruptions volcaniques sont connues pour produire des ondes de pression infrasoniques dans l'atmosphère qui se propagent vers le haut et dont l'amplitude croît considérablement avec l'altitude. Ces ondes se couplent avec le plasma ionosphérique et sont donc aisément détectables. Avec le développement des réseaux GPS (locaux et globaux) et le lancement du satellite DEMETER, de nombreuses études ont permis de déterminer les différents types d'ondes se propageant dans l'ionosphère (ondes Rayleigh, ondes acoustiques) et ainsi de déterminer leurs propriétés en fonction du phénomène source (séismes, tsunamis ou volcans), en termes de direction de propagation, de périodicité et de temps de propagation entre la source et l'ionosphère.

Dans le cas des tsunamis, les études ont pour but d'évaluer dans quelle mesure les ondes de gravité acoustiques atmosphériques peuvent servir à détecter et à suivre la propagation des tsunamis et donc prévenir les populations de l'arrivée de tels phénomènes sur les côtes. Les perturbations du TEC ionosphérique mesurées par GPS ont ainsi été observées 17 min avant l'arrivée du tsunami de Tohoku de 2011. Depuis quelques années, d'autres techniques de sondage ont été proposées pour suivre les propriétés de ces ondes de gravité tels que les radars Over-The-Horizon (ou OTH) depuis le sol, des perturbations induites dans les émissions VLF terrestres ou à l'aide de monitoring de l'airglow (recombinaison dissociative de l'ion O_2^+ ionosphérique responsable d'une émission à 630 nm observable la nuit) par des caméras au sol, tels que dans le cas du grand séisme de Tohoku de 2011. Les

perturbations dans l'airglow précédaient d'environ 1h l'arrivée du tsunami et par conséquent pouvaient être utiles à des fins préventives. Le TOSCA est largement impliqué dans des études de R&D pour réaliser des caméras adaptées à la détection de l'airglow depuis l'espace. De telles caméras pourraient ensuite être embarquées sur satellites (Projet IONOSAT2 de Cubsat).

Par l'étude des déformations de surface et des variations de gravité

Pour les déformations de surface, les travaux réalisés au cours des dernières années se sont focalisés sur la mesure des signaux de faible amplitude (de l'ordre du millimètre par an) liés aux déformations intra-plaques, aux couplages inter-plaques, à la déformation lente intersismique à partir de mesures GPS, et d'interférométrie différentielle d'images radar (DInSAR). Ces travaux ont nécessité des développements méthodologiques importants récents en GPS (technique de positionnement PPP par GNSS), DInSAR (technique de réflecteurs permanents) et corrélation d'images optiques multi sources. La majorité des études combinent désormais plusieurs techniques spatiales (DGPS, DInSAR, ...). Ces études nécessitent des archives d'images (Radar et Optique) importantes ainsi que des continuités d'acquisition. Les techniques utilisent désormais plusieurs dizaines d'images sur quelques dizaines d'années.

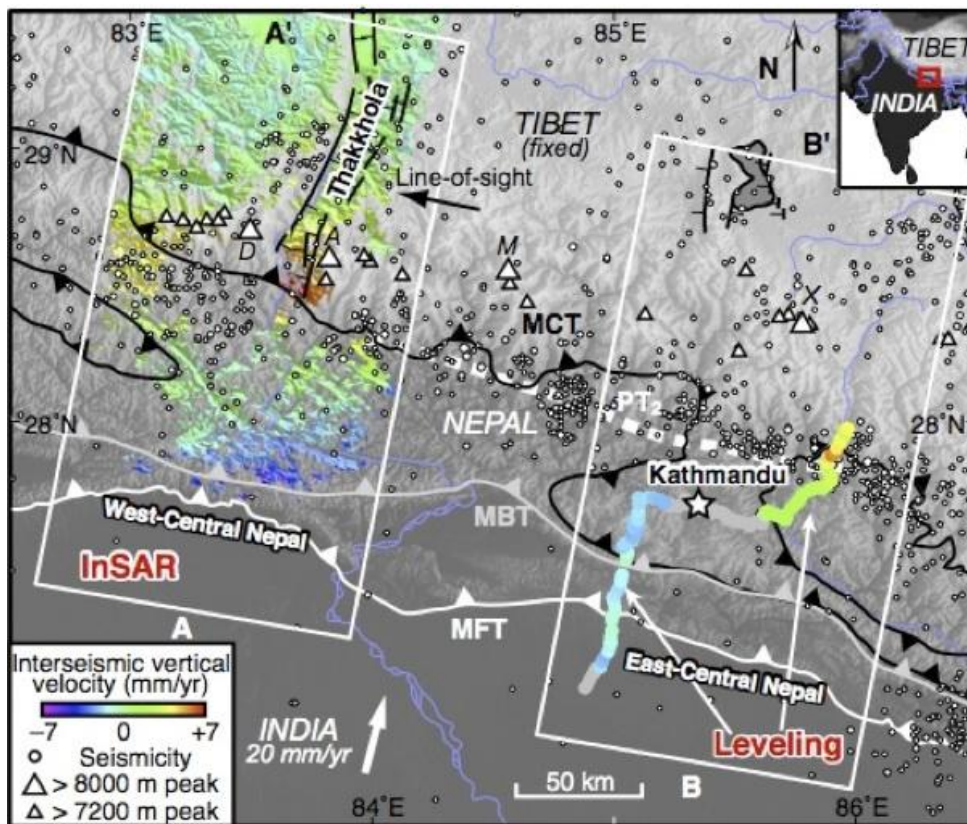


Figure 5 : Premières mesures InSAR de la déformation intersismique à travers l'Himalaya (Grandin et al., 2012)

Pour la première fois avec le séisme de Sumatra (Mw 9,2) de Déc. 2004, des variations de gravité produites par la réponse de Terre solide à une rupture sismique majeure ont pu être mises en évidence depuis l'espace à partir d'observations de la mission gravimétrique GRACE. Ces observations, acquises à 500 km d'altitude, ont donné un éclairage nouveau sur la déformation lithosphérique à grande échelle. Elles apportent une information très complémentaire aux réseaux sol du fait de leur couverture spatiale homogène (y compris en mer, dans des zones habituellement non couvertes par les réseaux

géodésiques) et de leur sensibilité aux processus à grande échelle affectant le manteau. La gravimétrie satellitaire s'avère donc particulièrement utile pour l'étude des grands séismes de subduction, Ainsi, depuis son lancement en 2002, la mission GRACE a permis de détecter des variations de gravité associées aux trois séismes majeurs survenus au cours de cette décennie : en Indonésie (Sumatra Mw 9.1, Dec 2004), au Chili (Maule Mw 8.8, Fev. 2010) et au Japon (Tohoku Mw 9.0, Mars 2011) et d'apporter des observations originales et très complémentaires aux données sismologiques et géodésiques pour l'étude du cycle sismique (caractérisation des déplacements verticaux et des variations de masse ou de densité dans la croûte et le manteau supérieur, détermination des paramètres rhéologiques de la lithosphère, etc.). Les recherches actuelles portent sur la mise en œuvre de nouvelles méthodes d'analyse des données pour tenter d'améliorer l'extraction de signaux co- et post-sismiques (en raison du faible rapport signal sur bruit de ces signaux géodynamiques dans les données GRACE) et sur la confrontation avec des données de surface (mesures GPS, InSAR, gravimétrie absolue...) pour mieux caractériser la réponse de la lithosphère à différentes échelles.

Dynamique de la lithosphère et surcharges (atmosphériques, hydrologiques, glaciologiques...) -

Les travaux sur les déformations liées aux surcharges (réponse de la croûte terrestre aux transferts de masses dans les enveloppes fluides) ont connu un essor important via la géodésie spatiale. Ces mesures géodésiques complémentaires des mesures GRACE apportent des informations sur les transferts de masse en surface. Des travaux récents, confrontant résultats géodésiques et modèles d'effets de charge, ont montré un accord de sub-millimétrique à quelques mm (à la fréquence annuelle) entre séries GPS et modèles, suivant les sites. Les travaux illustrent parfaitement la réciprocity des besoins entre géodésie et géophysique. En effet, la mise en évidence et la compréhension des phénomènes géophysiques imposent des critères stricts de qualité aux résultats de la géodésie et, inversement, la modélisation de ces phénomènes permet d'expliquer et donc d'améliorer les résultats de la géodésie. Ils illustrent également toute l'importance de disposer de modélisations très précises des phénomènes affectant la croûte.

Les modèles de rebond postglaciaire sont nécessaires à l'interprétation des variations temporelles du champ de gravité afin d'en extraire la composante climatique, i.e., les variations des stocks d'eau des grands bassins hydrologiques ou des stocks de glaces des calottes glaciaires. Les mesures apportées par la géodésie peuvent être utilisées pour valider ces modèles. A ce titre, la précision de 0.1 mm/an requise pour que les informations de vitesses permettent de contraindre significativement les modèles de rebond et, en conséquence, les variations actuelles des glaces, n'est pas encore atteinte et des sites d'observation, situés plus à l'intérieur des régions du rebond (Antarctique et Groenland, en particulier), font défaut. Les vitesses verticales de l'ITRF2008 sont plus cohérentes avec les modèles de rebond que celles des réalisations passées. L'ITRF2008 a également été utilisé pour étudier les variations lentes de la forme de la Terre à très grandes longueurs d'onde, ce qui a permis de confirmer une remise en cause récente de certaines modélisations du rebond postglaciaire.

Dynamique du Noyau - Les satellites Oersted et CHAMP ont ouvert une fenêtre sur les variations très rapides du champ magnétique terrestre. La communauté scientifique ne sait pas encore interpréter complètement ces variations car des phénomènes d'origines interne et externe se juxtaposent. Grâce aux données satellitaires, des avancées notables dans la modélisation du champ magnétique du noyau et de ses variations ont pu être réalisées. Pour la première fois, la variation séculaire est mieux connue que le champ lui-même. Cela a permis aussi d'avoir un nouveau regard sur les mouvements à la frontière noyau-manteau. Dans le noyau, à haute fréquence et grande échelle spatiale, les forces de rotation sont prédominantes et en grande partie équilibrées par les seules forces de pression : les écoulements sont

quasi-géostrophiques, c'est à dire aussi invariants dans la direction parallèle à l'axe de rotation que les conditions aux limites le permettent.

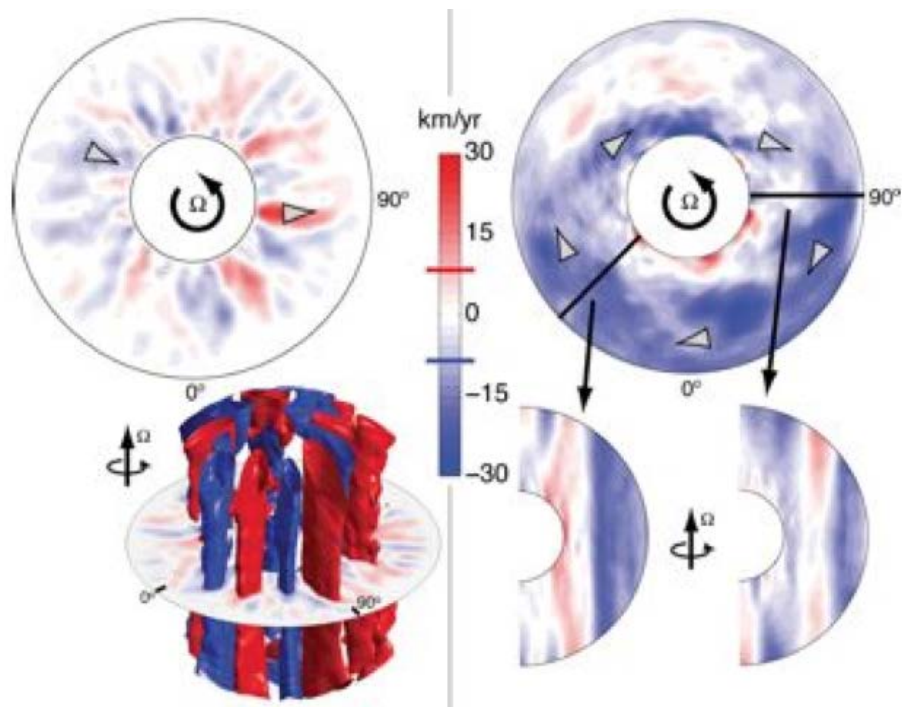


Figure 6 : Mouvements dans le noyau déduits des observations magnétiques satellitaires (Aubert, 2013): un grand vent excentré à l'échelle du noyau liquide (à droite) et des écoulements en colonnes organisées autour de l'axe de rotation de notre planète (à gauche)

4-C MISSIONS EN COURS ET AVANCEMENT DES MISSIONS

DEMETER (CNES): Le satellite a été désactivé fin 2010. Les études ionosphériques se prolongent avec la mission TARANIS (relevant de la commission Soleil- Héliosphère - Magnétosphère du CNES) dédiée aux couplages entre l'atmosphère, l'ionosphère et la magnétosphère terrestre lors des orages atmosphériques. Par ailleurs, les sismologues ont découvert récemment que la plupart des forts tremblements de Terre se produisant à la frontière des plaques sont précédés de séquences sismiques. Il est donc possible qu'une meilleure compréhension du déclenchement des séismes débouche à terme sur la proposition d'une nouvelle mission satellitaire.

CHAMP (DLR/NASA/CNES). La mission CHAMP (Challenging Mini-satellite Payload), lancée en juillet 2000 et détruite en septembre 2010 est la première mission dédiée à la détermination simultanée du champ de gravité et du champ magnétique terrestre. Elle a fourni les premières données précises et globales de référence sur les champs gravimétriques et magnétiques pour l'étude de la Terre Solide.

GRACE (NASA/DLR). La mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), lancée en mars 2002 (durée de vie : >10 ans), comporte deux satellites jumeaux reliés par un lien électromagnétique

(KBR) qui mesure leur éloignement à quelques micromètres. Ces deux satellites sont dédiés à l'étude du champ de gravité terrestre et à ses variations à l'échelle de plus de 400 km. Les modèles variables GRACE produits par le GRGS sont décrits et délivrés sous forme de coefficients harmoniques sphériques, de cartes de hauteur de géoïde ou encore transformés en hauteur d'eau équivalente, à travers le site web ainsi que celui du BGI. Actuellement, la situation des satellites GRACE n'est pas au niveau nominal, mais a été stabilisée au prix de beaucoup d'efforts, et d'une dégradation des données (trous de mesure).

GOCE (ESA) (Gravity field and steady state Ocean Circulation Explorer mission), lancée en mars 2009. C'est la première mission sélectionnée par l'ESA dans le programme Earth Explorer. Elle cartographie le champ de gravité terrestre globalement avec une résolution de 100 km pour une précision restituée du géoïde de l'ordre du cm pour les besoins de l'océanographie, de la géophysique et de la géodésie. L'objectif est de fournir aux utilisateurs du projet GOCE un nouveau modèle de champ de pesanteur de la Terre sous la forme de coefficients harmoniques sphériques de haute résolution. La France participe à un consortium de dix équipes européennes, EGGC, constitué pour les traitements de Niveau 2. La mission du satellite GOCE s'est terminée en novembre 2013 avec la rentrée du satellite dans l'atmosphère.

SWARM (ESA) : La mission Swarm a été sélectionnée à l'ESA en 2004 comme la 4^{ème} « Mission d'opportunité » du programme Earth Explorer et les 3 satellites ont été lancés avec succès le 22 novembre 2013. La mission Swarm a pour objectif scientifique la mesure du champ magnétique terrestre par une constellation de trois satellites identiques. La configuration originale des orbites permettra de séparer les différentes contributions au champ géomagnétique (contributions produites par la dynamo du noyau, les courants induits dans la Terre, la lithosphère aimantée, les courants induits dans les masses d'eau océanique en mouvement, ainsi que les courants ionosphériques et magnétosphériques) de manière optimale, et donc de réduire la limite que constituent les signaux mal identifiés. Les données de cette mission permettront l'étude la plus complète jamais entreprise du champ géomagnétique et de son évolution dans le temps. Cela permettra d'améliorer notre connaissance du système terrestre en apportant un nouvel éclairage sur les processus qui se déroulent à l'intérieur de la Terre, ainsi que sur la météorologie de l'espace.

La livraison de l'instrument à la mission Swarm bénéficiera à la communauté internationale des sciences de la Terre étudiant le champ magnétique terrestre. Swarm permettra une cartographie de l'ensemble des composantes du champ magnétique avec une résolution inégalée, sur une durée nominale de 4 ans..

DORIS : DORIS est un système civil français d'orbitographie et de localisation précise. Ce système fonctionne sur le principe de l'effet Doppler entre un réseau de stations terrestres émettrices et des instruments à bord de la charge utile des satellites. Quatre nouveaux satellites emportant ce système (Jason-2 depuis 2008, Cryosat-2 depuis 2010, HY-2A depuis 2011 et SARAL/Altika depuis 2013) ont rejoint la constellation des autres satellites déjà équipés (Spot-4, Spot-5, Envisat, Jason-1). Cette configuration à 7 satellites a permis d'améliorer la précision des mesures de 30%. L'une des tâches récurrentes des centres d'analyse DORIS CNES/GRGS et IGN est le traitement en mode opérationnel des données DORIS sur l'ensemble des satellites porteurs actifs, aboutissant à une série hebdomadaire de positions des balises du réseau.

SPOT 5 - Pléiades : Lancé en 2002, SPOT5 devrait cesser fin 2014 d'acquérir des images. Il abrite deux capteurs, HRG, résolution 2.5 m, fauchée 60 km et le capteur stéréo HRS, résolution 5 m, fauchée 120 km. Les scientifiques européens peuvent accéder aux données SPOT5 à des tarifs préférentiels via le

programme ISIS. Ses successeurs, SPOT6 et SPOT7 (1.5 m de résolution, fauchée 60 km) sont des satellites purement commerciaux (Astrium) et les procédures d'accès à leurs images ne sont pas encore connues (ISIS ?). La constellation Pléiades (1A et 1B) est opérationnelle depuis début 2013, fournissant des images très haute résolution (0.7 m). La démonstration du potentiel des images Pléiades est en cours via la recette en vol thématique des utilisateurs, pilotée par le CNES. L'accès aux données Pléiades est aussi possible à tarif préférentiel via ISIS.

4-D STRUCTURATION DE LA COMMUNAUTE ET POSITIONNEMENT INTERNATIONAL

Depuis la prospective de Biarritz, et suite à une modification dans sa rédaction, l'Appel d'Offre Tosca a connu un intérêt accru de la part de la communauté Terre Solide. Cela s'est traduit par une augmentation significative du nombre de projets déposés (de 27 en 2006 à 50 en 2013) notamment avec un nombre important de projets en lien avec l'imagerie de surface.

Le comité a dans la mesure du possible tenté de stimuler des regroupements thématiques de projets, ce qui s'est traduit par une meilleure structuration de la communauté (par exemple pour la diffusion et l'archivage de données et produits issus des mesures gravimétriques sol et spatiales : rattachement du Bureau FROG au BGI) et par le dépôt de propositions comprenant la quasi totalité de la communauté concernée, par exemple sur la mission de Lidar Topographique ou de l'imagerie Thermique Infra Rouge. Dès 2012, un groupe a été coordonné par Olivier Jamet (IGN) pour réfléchir à la structuration de la communauté autour d'un pôle thématique. Les échanges ont eu lieu lors de plusieurs réunions plénières et par l'intermédiaire d'un blog (<http://poleterresolide.free.fr/>). 40 scientifiques ont participé à ces réflexions et abouti à un document de synthèse sur la création d'un pôle Terre Solide, baptisé ForM@Ter. Deux groupes de travail ont été identifiés (Gravimétrie-Géodésie et Imagerie de surface) pour conduire la réflexion sur les besoins et états des lieux de ces différentes communautés scientifiques directement impliqués dans l'initiative Form@Ter.

Le positionnement international de la communauté française en Géodésie, Gravimétrie et Magnétisme est fort comme en attestent les différents services internationaux basés en France et coordonnés par des équipes françaises : Bureau Gravimétrique International : <http://bgi.obs-mip.fr/fr/>, l'International Doris Service: <http://ids-doris.org/>, <http://itrf.ensg.ign.fr/>, ou dans lesquels la France a un rôle majeur : International Earth Rotation and Reference System Service <http://www.iers.org>, centres de produit ITRS (<http://itrf.ign.fr>), ICRS (<http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/>) et des paramètres de rotation de la Terre (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>), centres d'analyse IDS, IGS, ILRS et IVS, l'International Geomagnetic Reference Field <http://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html>, the International Association of Geomagnetism and Aeronomy <http://www.iugg.org/AGA>. La position de Leader de la France dans le domaine de la mesure des déformations de surface dans les années 1995-2000 a décliné au cours des années 2000-2009. Depuis le séminaire de Biarritz, sous l'impulsion de nouveaux chercheurs, la communauté française s'est réorganisée à la fois dans le domaine du radar et de l'optique. Le pôle ForM@Ter a un rôle majeur à jouer pour accompagner ce dynamisme.

4-E CONCLUSIONS

Swarm restera une priorité dans l'exploitation de données, car les mesures de cette mission permettront des études approfondies du noyau, du manteau et de la lithosphère. Le CNES et la communauté

magnétique française participent à ce projet, en fournissant les magnétomètres absolus et la validation scientifique des données acquises.

Même si les efforts menés dans le cadre du projet Micromega n'ont pas abouti à une mission spatiale, la communauté française constitue un élément clé dans les études liées au champ de gravité, étant fortement impliquée dans l'exploitation de données CHAMP, GRACE et GOCE. De plus, une participation française est prévue dans le processus de cal-val de données GRACE-FO (NASA), programmée pour 2017.

Puisque les besoins en topographie des terres émergées et bathymétrie littorale globales sont toujours d'actualité, la communauté scientifique française s'est fédérée pour proposer une mission topographique terrestre avec un concept stereo-lidar (Z-Earth) et pour progresser dans la connaissance du potentiel du signal Lidar bathymétrique. En outre, les MNTs déduits des couples stéréoscopiques Pléiades sont fortement attendus. En ce qui concerne la bathymétrie globale régionale il s'agira soit de proposer des missions altimétriques en constellation peu coûteuses (projet GRAL) soit d'exploiter les résultats d'altimétrie à large fauchée du satellite SWOT dont le concept d'altimétrie par interférométrie permettra d'obtenir une meilleure couverture surfacique des observations par rapport à la mesure quasi-ponctuelle des altimètres actuels (Jason). Il reste toutefois à démontrer que SWOT fournira des informations utiles sur les zones non plates.

L'augmentation significative des projets en imagerie de surface prouvent le dynamisme de la communauté sur les techniques de mesure de déformation de surface par imagerie radar et optique dans différents contextes géodynamiques (cycle sismique, volcanisme, mouvements gravitaires....). La particularité de ces projets est désormais d'intégrer d'autres mesures géophysiques (DGPS ou gravimétrie par exemple).

Grâce à DEMETER, la thermodynamique de l'ionosphère est aujourd'hui mieux comprise. Des progrès significatifs ont également été réalisés pour mieux contraindre la propagation des ondes électromagnétiques d'origines naturelles ou artificielles et la possible déstabilisation des ceintures de radiations lorsque ces ondes atteignent la magnétosphère interne. Enfin, grâce aux mesures de TEC et d'Airglow, il est aujourd'hui possible de caractériser en détail la propagation dans l'ionosphère d'ondes générées par des séismes et des tsunamis. Dans le cas des tsunamis, le monitoring de ces ondes depuis l'espace devrait permettre dans un futur proche de prédire leurs lieux et temps d'impact sur les côtes.

La mission Demeter n'a pas permis de conclure à l'existence ou non de précurseurs ionosphériques aux séismes. En l'absence d'un modèle physique qui prédirait une activité ionosphérique particulière, les études sont forcément de nature statistique. L'importante variabilité naturelle (c'est-à-dire indépendante de tout forçage provenant de la croûte terrestre) de l'ionosphère et la complexité des descriptions modernes de l'activité sismique expliquent la difficulté à conclure de manière définitive à l'existence de précurseurs.

La facilité d'accès aux données et la pérennité des mesures pour l'Observation sont des besoins fondamentaux de la communauté. Au niveau international, l'exploitation des images SPOT5 (meilleur compromis haute résolution/vaste surface couverte depuis 10 ans) reste limitée en raison de la difficulté d'accès à la donnée. Lors du projet SPIRIT de cartographie des glaces pendant l'année polaire internationale (2007-2009), les images et MNT SPOT5 ont été distribués gratuitement aux scientifiques. A ce jour, on compte déjà plus de 70 publications utilisant ces données. Cela montre que si la donnée est facilement/gratuitement disponible, elle intéresse fortement les scientifiques. L'amélioration de la qualité des algorithmes de mesure de déformation de surface permet désormais d'accéder à des déformations de surface de l'ordre du mm par an radar et du cm en optique. Cependant ces techniques nécessitent

une grande quantité de données compatibles entre elles. Il est donc critique pour la communauté que des images soient régulièrement acquises avec des caractéristiques identiques.