

## GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE TERRE SOLIDE

Pascal Allemand, Etienne Berthier, Sylvain Bonvalot, Xavier Briottet, Rodolphe Cattin, Patrick Charlot, David Coulot, Christophe Delacourt (Président sortant), Olivier de Viron (Président entrant), Michel Diamant, Bénédicte Fruneau, Marianne Greff, Mioara Manda (thématicienne), Aurélie Marchaudon, Isabelle Panet, Erwan Pathier, Lucie Rolland, Erwan Thébault, Guy Wöppelmann.

### Introduction

Le périmètre d'étude du groupe Terre solide (TS) couvre la géophysique interne, la géodynamique, la géodésie, ainsi que les couplages entre la Terre solide et les enveloppes externes. Les scientifiques de la Terre solide s'attachent donc à comprendre son fonctionnement interne : histoire et évolution de sa composition (répartition et nature des matériaux, propriétés rhéologiques, couplage entre enveloppes) et de sa dynamique ; comme ses impacts en surface (séismes, volcanisme, déformations crustales en réponse au rebond postglaciaire,...). Ils s'attachent également à caractériser les risques telluriques et les ressources du sous-sol, et à participer au suivi des changements globaux. L'une des difficultés majeures réside dans l'impossibilité d'observer directement l'intérieur de notre planète : au-delà de 10 km de profondeur, la connaissance de la Terre est déduite uniquement de mesures indirectes au sol, aériennes ou spatiales. De plus, les phénomènes géodynamiques et climatiques ont des échelles de temps allant de la seconde à plusieurs millions d'années. Leur étude requiert donc un suivi fréquent, voire continu. De par leur caractère global et répété depuis plusieurs décennies, les observations spatiales sont donc pour la communauté TS un jeu de données incontournable.

La Terre solide est soumise à des sollicitations d'origine interne, liées aux processus physiques et chimiques qui ont cours dans le noyau, le manteau et la croûte, mais aussi d'origine climatique – associées à la dynamique de l'atmosphère, de l'océan, de l'hydrologie, de la glace – et externe au système Terre, telles qu'exercées par la Lune, le Soleil et les planètes. En réponse à ces contraintes, les masses de la Terre solide se déplacent, et la forme de la Terre, son champ magnétique et son orientation dans l'espace sont modifiés.

La variabilité spatio-temporelle des processus internes constitue un défi dans l'étude de la Terre solide. Ainsi, les échelles temporelles et spatiales caractéristiques varient sur plusieurs ordres de grandeurs : depuis la seconde (séismes) aux millions d'années (tectonique des plaques) et du centimètre (faille) à la dizaine de milliers de kilomètres (dorsales médio océaniques par exemple). Des processus à l'œuvre dans la Terre solide interagissent avec ceux des enveloppes externes (impacts du volcanisme sur le climat, formation et destruction des reliefs, déplacements horizontaux et verticaux, ajustement glacio-isostatique...). Ils sont aussi à l'origine des risques telluriques qui affectent une population de plus en plus nombreuse et dense dans les zones actives (sismique / volcanique/ glissements de terrain) ou menacées (littoraux).

Les données spatiales permettent de déterminer avec précision la forme, l'orientation et la distribution de masse de la Terre à l'équilibre – ou au moins à long terme – et d'en suivre l'évolution au cours du temps, avec une distribution homogène en qualité. Similairement, on détermine à partir des données spatiales le champ magnétique statique et son évolution temporelle. Combinées avec des données de géophysique *in situ*, les données spatiales nous donnent alors accès à une connaissance de plus en plus précise, résolue, pérenne et homogène des principales observables de la Terre solide. Ces informations diverses et complémentaires participent à la construction de cette compréhension globale de la dynamique, du fonctionnement et de l'évolution du système Terre.

Cette construction passe par l'analyse et l'interprétation d'un ensemble de données hétérogènes nécessitant d'améliorer la complexité des modèles et la précision de l'information. On le voit, l'utilisation des données spatiales en Terre solide requiert de mobiliser des chaînes de traitements et d'inversions complexes, où la propagation des erreurs est un enjeu majeur. Ce n'est qu'en accumulant sur le long terme des observations continues de la meilleure qualité – précision, homogénéité, localisation – que l'on peut accéder aux signaux d'origine interne parfois dominés par des contributions externes, par exemple liées à la dynamique climatique. Inversement, parce que l'essentiel des phénomènes qui ont cours dans le système Terre modifie sa forme, son champ de pesanteur et/ou son champ magnétique, les observables « Terre solide » fournissent des informations, avec une couverture globale et une haute précision, pour la compréhension de la dynamique du système Terre. La géodésie, quant à elle, permet non seulement le positionnement précis ou le suivi des déformations, mais fournit aussi la référence de l'ensemble des mesures sur le Système Terre.

# 1. Bilan et avancées depuis la prospective 2014

## 1.1. RETOUR SUR LA MISE EN ŒUVRE DES PRIORITÉS DU SÉMINAIRE DE PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE DE LA ROCHELLE

### 1.1.1. PRIORISER LES MISSIONS SPATIALES

**GRASP :** De nombreuses applications scientifiques et sociétales, tels que le suivi du niveau moyen des mers, nécessitent une précision et une stabilité du système de référence avec une exactitude de 1 mm en position et 0.1 mm/an en vitesse. L'importance de cette référence est d'ailleurs mondialement reconnue depuis l'adoption, en 2015, par les Nations Unies, de la résolution A/RES/69/266. Un satellite de type GRASP est nécessaire pour atteindre ce niveau de qualité. Or, malgré une reconnaissance de l'intérêt scientifique d'une telle mission par toutes les communautés du TOSCA, une validation technique du concept, une démonstration par simulations numériques de la possibilité d'atteindre ces objectifs et des contacts pris avec d'autres agences spatiales (NASA, etc.), une telle mission n'est pas encore programmée.

**Z-Earth :** Le besoin d'une topographie globale, précise et répétée des surfaces continentales est toujours très présent et pas uniquement en Terre solide (e.g., surfaces continentales). Le concept Z-Earth, soutenu à La Rochelle, a évolué dans le cadre d'une phase 0 (nommée Menfis). Aujourd'hui, c'est la mission Co3D qui fait l'objet d'une phase A, toujours pour réaliser un Modèle Numérique de Terrain (MNT) global. Aussi, une option "stéréo" est actuellement à l'étude (phase B) dans le cadre du concept SENTINEL-HR pour répondre à la forte demande en répétitivité de l'information topographique.

Pour ces deux missions, il est important que la communauté scientifique puisse bénéficier d'un accès rapide et complet aux données topographiques.

### 1.1.2. ASSURER LA CONTINUITÉ ET LA COMPATIBILITÉ DES MISSIONS

L'accès à des signaux faibles, et à leurs variations spatiales et temporelles, impose d'améliorer les techniques de mesure et d'étendre la période d'acquisition des données qui doivent être compatibles entre elles.

**Imagerie Radar :** La mesure fine des déformations de surface par imagerie satellitaire nécessite le traitement de longues séries temporelles d'images radar et par là-même une continuité des acquisitions. Celle-ci est assurée avec la constellation Sentinel-1, dont la pérennité est désormais garantie au moins jusqu'en 2030. La communauté française, fédérée grâce à ForM@Ter autour des techniques d'interférométrie radar et de corrélation d'images, dispose désormais de chaînes de traitement spécifique. Ces chaînes, en développement continu, forment le noyau d'outils qui seront accessibles en ligne par la communauté pour diverses applications (calcul à la demande, série temporelle, ...).

**Magnétisme - Prolongation de Swarm et préparation Nanomagsat :** Grâce à ses trois satellites aux orbites désynchronisées, la mission européenne Swarm a permis de mieux modéliser les processus électromagnétiques générateurs de champs géomagnétiques et de mieux prévoir leurs évolutions temporelles. L'ESA a reconnu l'importance d'une surveillance continue pour la navigation aéronautique et la météorologie de l'espace en prolongeant la mission de 5 ans. Le projet Nanomagsat, mission française en cours d'investigation, a vocation à pérenniser la mesure spatiale après Swarm en exploitant des nanosatellites et des magnétomètres miniaturisés.

**Gravimétrie GRACE Follow-on et GRICE :** La connaissance fine et globale du champ de pesanteur terrestre et le suivi des masses dans le système Terre depuis l'espace grâce aux missions dédiées de gravimétrie spatiale du début du XXI<sup>e</sup> siècle ont révolutionné de nombreux domaines (hydrologie, cryosphère, géodynamique,...). L'enjeu est désormais d'assurer la continuité de la mesure des variations temporelles du champ de pesanteur tout en améliorant résolution et précision. La continuité est certes assurée aujourd'hui avec la mission GRACE Follow-on mais reste fragile, d'autant que la mission ne fonctionne actuellement pas de façon nominale. En outre, de nombreuses améliorations sur la qualité de la mesure sont encore nécessaires, par exemple autour de développements novateurs (interférométrie atomique dans GRICE, accéléromètres hybrides, liens laser...). Il a aussi été démontré l'intérêt de disposer de deux missions de type GRACE Follow-on sur des orbites différentes dans le cadre d'une coopération internationale.

### 1.1.3. FACILITER L'EXPLOITATION DES DONNÉES

La communauté scientifique TS utilise les données de nombreux satellites d'observation de la Terre en activité ou ayant acquis une archive conséquente. Ces données, au potentiel important, sont parfois sous-exploitées. Il est donc nécessaire de faciliter l'accès aux données d'archive avec des tarifs attractifs et d'attirer de nouveaux scientifiques aux approches complémentaires vers le spatial. Dans ce même objectif, il est aussi important de faciliter la mise à disposition et l'exploitation de données in situ complémentaires aux observations spatiales. Au cours des 4 dernières années, des initiatives ont été mises en place : SPOT World Heritage pour mettre à

disposition une partie des archives SPOT, accès facilité aux images Pléiades et SPOT6-7 pour les chercheurs. Ces procédures d'accès à la donnée fonctionnent plutôt bien mais montrent leur limite dès que des grands volumes de données sont nécessaires ou quand une forte réactivité est souhaitable.

Depuis le séminaire de prospective scientifique de La Rochelle, le pôle de données et de service pour la Terre solide, intitulé ForM@Ter, s'est mis en place, en application du rapport sur les pôles de données et de service. Il a pour mission, au sein de l'Infrastructure de Recherche Data Terra, de fournir un accès aux données et de développer des produits et des services pour la recherche en Terre solide, et plus généralement sur le système Terre. Il se construit dans un contexte d'une augmentation exponentielle des données satellitaires pertinentes liées aux missions d'observation ou à des projets portés par des initiatives privées.

#### 1.1.4. RENFORCER LA STRUCTURATION DE LA COMMUNAUTE

- L'effort de structuration de la communauté via des regroupements thématiques de projets a été poursuivi via le pôle ForM@Ter. De nombreux projets déposés dans le cadre de l'APR CNES, axés sur les outils et méthodes, s'inscrivent désormais dans le cadre de ForM@Ter.
- Malgré des recommandations, de nombreuses activités liées à l'analyse et au traitement des données de géodésie spatiale ou à la préparation de missions spatiales ne sont pas suffisamment intégrées dans des Services Nationaux d'Observation. Les discussions avec l'INSU et des structures fédératrices intermédiaires (GRGS par exemple) sont toujours en cours.
- L'ouverture pluridisciplinaire (au niveau TS) s'est illustrée par une augmentation significative des projets multi capteurs.

### 1.2. LES AVANCÉES SCIENTIFIQUES

Depuis le séminaire de La Rochelle, l'utilisation de nouveaux capteurs plus performants, l'allongement de la période d'archive de données et des développements méthodologiques ont permis de mesurer des signaux à des amplitudes et des échelles spatiales et temporelles inédites, et ainsi de progresser dans la compréhension de processus géophysiques associés, depuis l'ionosphère jusqu'au noyau terrestre. Par ailleurs l'accès à ces nouvelles mesures a permis de relier plusieurs communautés qui travaillaient sur les mêmes processus mais avec des outils et méthodes différents.

#### 1.2.1. SIGNATURE IONOSPHERIQUE DE TSUNAMIS

Suite aux premières détections de tsunamis depuis l'espace à partir de perturbations de Contenu Électronique Total (TEC) déduites des signaux GNSS ou de perturbations d'émission de lumière atmosphérique (*airglow*) observées par des caméras au sol, une caractérisation plus systématique et une modélisation plus fine de ces signaux ont été entreprises. Plusieurs dizaines d'observations de tsunamis ont été rapportées par des équipes différentes utilisant le réseau GNSS mondial et trois vidéos de l'évolution de l'empreinte lumineuse du tsunami ont été effectuées à partir d'une seule caméra située à Hawaii. Les modélisations ont permis de prendre en considération les effets de la géométrie d'observation ou de la configuration du champ magnétique qui peuvent expliquer la mauvaise ou, exceptionnellement, la non-observation de certains tsunamis, ainsi que l'effet des vents horizontaux qui peuvent perturber la direction de propagation des ondes. Enfin, une méthode d'inversion a également été développée pour extraire la variation de hauteur d'eau à partir de la signature d'un tsunami dans le TEC. Appliquée avec succès à 3 tsunamis d'amplitude modérée (2 cm) à forte (60 cm), cette méthode permet d'envisager aujourd'hui un suivi en temps réel des tsunamis depuis l'espace. Ces résultats sont à l'origine de la mission satellite IonoGlow (aujourd'hui en phase 0) et dont l'objectif est de compléter les réseaux d'observation des tsunamis dans les zones peu ou pas couvertes via leur signature *airglow*.

#### 1.2.2. DEFORMATIONS DE LA SURFACE TERRESTRE

Les méthodes d'interférométrie radar et de corrélation d'images sont désormais couramment utilisées pour le suivi des déformations sismiques, volcaniques ou des grands glissements. Alliées à l'imagerie haute résolution (Pléiades, SPOT6/7), elles deviennent aujourd'hui pertinentes pour suivre des objets de petites tailles et les mouvements lents. Ainsi, couplées à des mesures GNSS continues (GPS, Galileo, Glonass,...), ces cartes de déformations ont permis, par exemple, de mettre en évidence la réponse d'un glissement de terrain péruvien (région d'Arequipa) dû à la fois à des secousses sismiques et à la pluviométrie régionale. Ce type d'étude permet de progresser dans la compréhension de la mécanique du glissement.

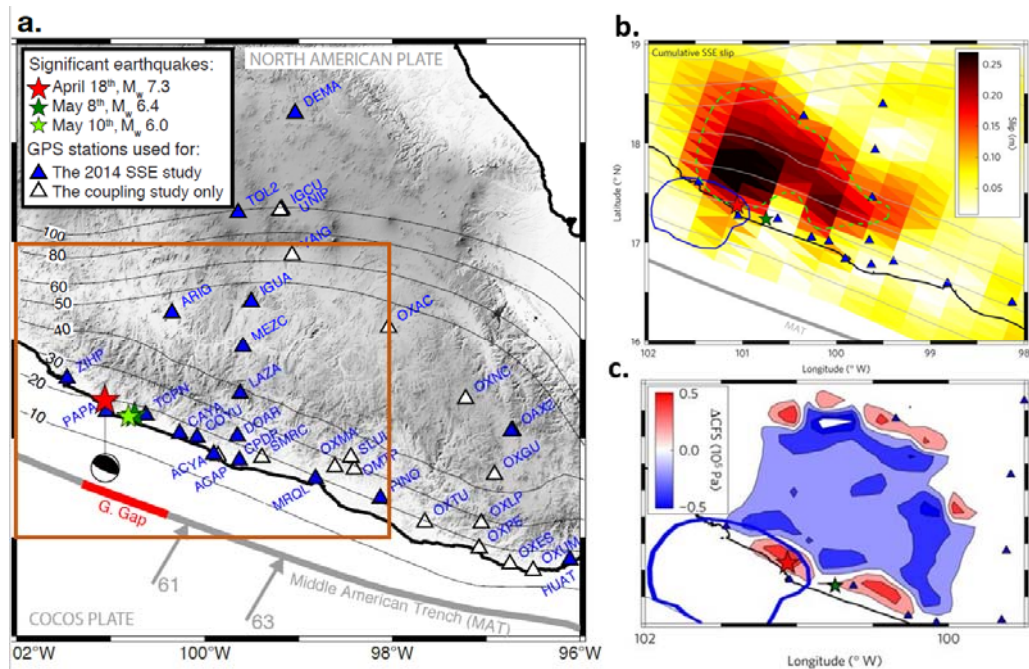
#### 1.2.3. COMPREHENSION DU CYCLE SISMIQUE

Les développements récents des méthodes interférométriques utilisant de longues séries temporelles InSAR couplées à des données GNSS permettent désormais d'aborder les mesures des déformations inter-sismiques et des séismes lents. En effet, les déplacements du sol de quelques millimètres par an sont classiquement mesurés de l'échelle locale à l'échelle continentale, y compris dans les régions à forte topographie. Ainsi, le long de la subduction mexicaine, les déformations de surface causées par plusieurs séismes lents ont pu être mesurées et



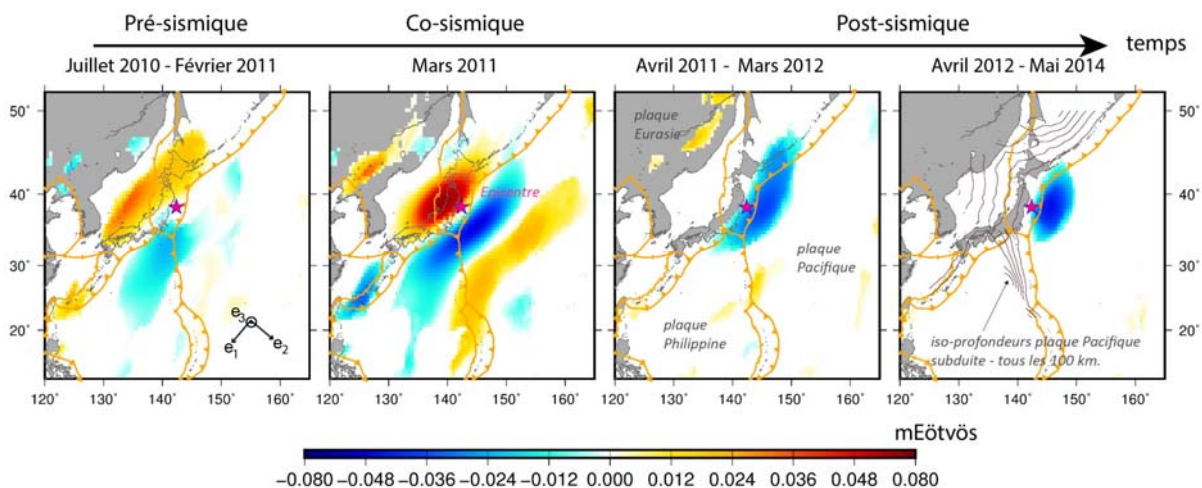
analysées. Elles ont permis de montrer que le séisme de Papanoa ( $M_w=7.3$ ) avait été déclenché par un événement de séisme lent débuté 2 mois plus tôt (Figure 1). Depuis la mise à disposition d'outils de corrélation d'image et de calcul de MNT, les archives d'images aériennes sont utilisées pour estimer les déplacements de séismes anciens. Des MNT peuvent également être calculés pour des images satellite à très haute résolution (Pléiades, SPOT6/7) afin d'identifier des marqueurs paléo-sismiques.

- Figure 1 : Déclenchement du séisme de Papanoa ( $M_w=7.3$ ) par le séisme lent de 2014 dans la région de Guerrero (Mexique). a) Carte de localisation, b) Carte montrant en couleur les déplacements cumulés du séisme lent de 2014 sur l'interface de subduction, et la localisation du séisme de Papanoa (contour bleu). c) Carte du changement de contraintes de Coulomb sur l'interface de subduction causé par le séisme lent, montrant que le point d'initiation du séisme (étoile rouge) se trouve dans une zone où le changement de contrainte favorise le déclenchement du séisme.



Les données de gravimétrie spatiale couplées ou non à celles de la géodésie spatiale sont désormais systématiquement analysées pour l'étude des processus co- et post-sismiques lors de très grands séismes. Par ailleurs, la détection d'un signal gravitationnel pré-sismique du méga-séisme de mars 2011 au Japon (magnitude 9.1) a été réalisée (Figure 2) : en analysant les variations du champ de gravité à partir des données des satellites GRACE dans un vaste domaine de l'espace et du temps encadrant l'événement de 2011, il a été montré que ce séisme était l'expression extrême d'une déformation, à l'origine silencieuse, migrant depuis la profondeur du manteau jusqu'à la surface terrestre au travers de l'intégralité du système de subduction.

- Figure 2: Panet et al., Nature Geoscience 2018. Détection par GRACE d'un signal pré-sismique (redistributions de masse en profondeur) associé au séisme de Tohoku ( $M=9.1$ ). On observe la migration d'Ouest en Est du signal gravimétrique, initiée quelques mois avant la rupture, jusqu'à l'intérieur de 2 plaques océaniques. La rupture apparaît comme événement extrême au sein d'un mouvement plus lent, se propageant des profondeurs vers la surface dans la zone de subduction.



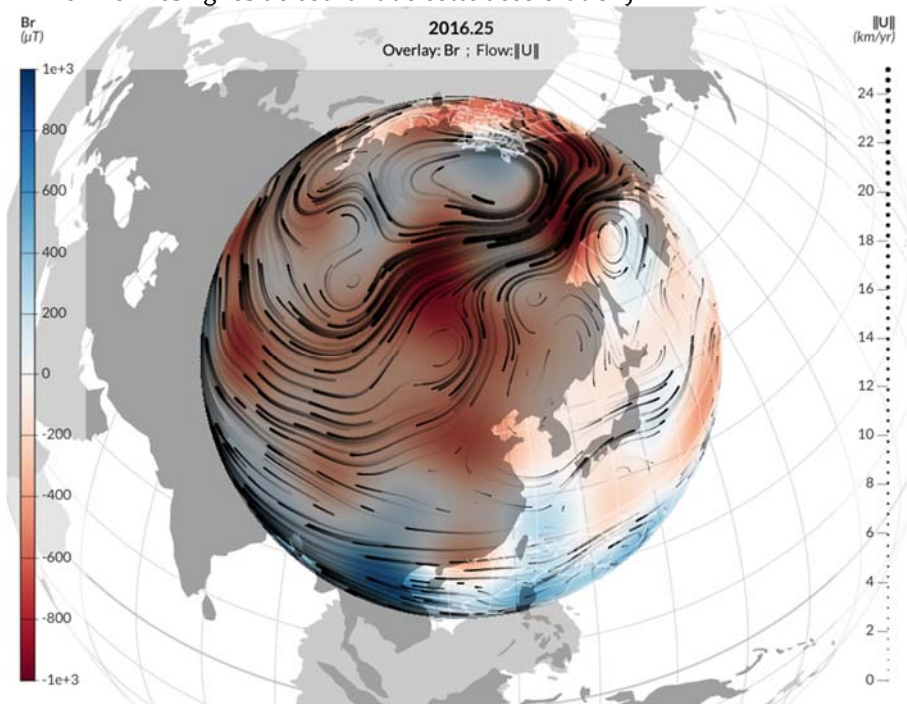
### 1.2.4. INTERACTION MANTEAU-SURFACE

Les analyses conjointes des données de gravimétrie spatiale (GRACE) et des déplacements du sol (GNSS) nous apportent des contraintes sur les rhéologies transitoires du manteau : par exemple, à partir du suivi des variations de masse en Antarctique, ou de la réponse viscoélastique de la Terre aux charges hydrologiques saisonnières. Sur de plus grandes échelles de temps, elles ont permis de prendre en considération les effets du rebond postglaciaire dans les modèles de vitesses de plaques tectoniques.

### 1.2.5. CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

L'objectif scientifique principal de Swarm est la caractérisation, la description et la compréhension du champ magnétique terrestre et de sa variabilité temporelle. Les mesures Swarm ont été utilisées pour la production du modèle géomagnétique international de référence et de sa variation séculaire (IGRF) le plus récent. Elles sont actuellement exploitées pour la mise à jour du modèle en 2020. Plusieurs laboratoires français sont impliqués dans la modélisation du champ magnétique du noyau. En assimilant les données de Swarm dans un modèle numérique de dynamo terrestre, des contraintes statistiques ont été obtenues sur les mouvements à la surface du noyau. En particulier, un gyre planétaire à la surface du noyau a pu être mis en évidence et caractérisé (Figure 3). L'inversion directe des données satellitaires a d'autre part révélé une accélération intense des flux au cours des 15 dernières années, et une accélération rapide de la dérive du pôle magnétique Nord.

Figure 3 : Accélération moyenne du mouvement sur la période 2000-2016, à la surface du noyau, obtenue par l'inversion des données spatiales (basées sur les mesures obtenues par les missions CHAMP et Swarm) et données d'observatoires au sol (l'échelle de couleur correspond à la norme de l'accélération (de 0 à 1 km/yr<sup>2</sup>), en noir les lignes de courant de cette accélération)



### 1.3. PRÉSENCE DE LA COMMUNAUTÉ TS AU NIVEAU INTERNATIONAL

La communauté française TS est très active dans la communauté internationale dans différents domaines :

a) La coordination ou la contribution aux services scientifiques internationaux de l'Association Internationale de Géodésie (IAG) ou de l'Association Internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie (IAGA). Dans le domaine Terre solide, plus qu'ailleurs sans doute, la communauté nationale et internationale est très structurées, avec des associations internationales actives et puissantes. La France est ainsi centre de produit pour l'International Terrestrial Reference Frame (ITRF) et diverses équipes animent des centres d'analyses ou centres de données pour les techniques de géodésie spatiale (International Doris Service, International GNSS Service, International Laser Ranging Service, International VLBI service for Geodesy and Astrometry, Earth Rotation and Reference System Services) ou de géomagnétisme (International Geomagnetic Index Service). Pour l'International Gravity Field Service (IGFS), elle héberge le Bureau Gravimétrique International (BGI) et l'International Geodynamics and Earth Tides Service (IGETS) et contribue à la production de modèles globaux de champs de gravité de l'International Center for Global Gravity Field Models (ICGEM). En magnétisme, elle contribue à la production du

modèle international géomagnétique de référence (IGRF) et assure la responsabilité du modèle des anomalies magnétiques crustales (World Digital Magnetic Anomaly Map).

b) L'exploitation scientifique des données : des chercheurs français sont membres des comités consultatifs (Advisory Board) du groupe Data, Innovation, and Science Cluster (DISC) pour l'exploitation scientifique de la mission européenne Swarm, et de l'International Gravity Field Service (IGFS). Ils animent également différents groupes de travail en étude et observation de la Terre sous l'égide de l'IAG ou de l'IAGA (ex : International Gravity Reference System).

c) Le pilotage de missions scientifiques : des chercheurs français sont co-initiateurs scientifiques de la mission européenne Swarm, et investigateur principal de mission en cours d'évaluation Nanomagsat.

## 2. Recommandations du groupe

### 2.1. AMELIORATION DE NOTRE CONNAISSANCE DE LA FORME DE LA TERRE

#### 2.1.1. GEODESIE

La géodésie spatiale, qui détermine la forme et l'orientation de la Terre, joue un rôle central dans nombre d'applications en Sciences de la Terre. Par la détermination précise des orbites des satellites d'observation de la Terre et des satellites de navigation, elle permet le référencement précis des observations dans l'espace et le temps, mais aussi le suivi des déformations de la Terre – mouvements tectoniques et gravitaires, réponse aux surcharges, réajustement isostatique. La précision des références géodésiques est en constante amélioration, même si les précisions-cibles du repère de référence - 1 mm d'exactitude et 0,1 mm/an de stabilité globale – nécessaires à son rôle fondamental et à son exploitation en termes de connaissance de la physique de l'intérieur de la Terre ne sont pas encore atteintes aujourd'hui. Atteindre ces objectifs passe par une amélioration de l'infrastructure d'observation au sol, en particulier pour l'interférométrie à très longue base (VLBI) et la télémétrie laser. Cela passe aussi par une meilleure connaissance, tant statistique que géophysique, des séries temporelles de positions de stations de référence et une amélioration des méthodes de traitements et de combinaison. La précision du lien entre les techniques est également un enjeu et une priorité du groupe Terre solide, avec une proposition d'envoi dans l'espace d'un ou plusieurs satellite(s) permettant une co-localisation globale des quatre techniques – DORIS, GNSS, SLR, VLBI - avec une qualité sans précédent. Plusieurs déclinaisons de cette mission ont été identifiées précédemment dans les projets GRASP (NASA, 2015), E-GRASP (ESA, 2016 et 2017) et MOBILE (ESA, 2018, mission de gravimétrie avec un volet géodésique de type GRASP), malheureusement non retenues. Ces projets, fédérateurs dans la communauté géodésique française et internationale, ont prouvé qu'ils permettraient une amélioration sans précédent de la qualité du repère terrestre. Le groupe Terre solide met donc en priorité absolue la mission MARVEL qui, en plus d'améliorer la qualité des données de gravimétrie spatiale, intègre l'instrumentation prévue pour le projet GRASP.

En parallèle, le groupe TS souligne la nécessaire complémentarité des mesures espace-sol, et recommande en priorité la mise en place d'un observatoire géodésique fondamental à Tahiti (Papeete, Polynésie française), qui serait doté d'une station de télémétrie laser nouvelle génération et d'une antenne VLBI qui sera financée par la NASA, en complément des instruments GNSS et DORIS, dans un cadre collaboratif international. La localisation de l'Observatoire de Tahiti est intéressante, puisqu'il est situé dans une zone à faible couverture en stations où des techniques géodésiques sont co-localisées. Y ajouter une station VLBI et le doter d'une station SLR de dernière génération permettra donc d'améliorer notablement la précision et la stabilité globale du système de référence.

#### 2.1.2. TOPOGRAPHIE ET BATHYMETRIE

Une détermination globale, précise, homogène et répétée de la topographie et de la bathymétrie est nécessaire en Terre solide et au-delà (e.g., surfaces continentales, groupes transverses littoral et cryosphère). La comparaison de topographies précises et répétées permet de caractériser l'impact des processus dynamiques à la surface du globe : les déplacements des mouvements gravitaires, des séismes, des volcans, du littoral (cordons dunaires, ou morphologie de plage) ou les changements de volume des glaciers et calottes polaires, voire les variations saisonnières du manteau neigeux. Ce besoin 3D sera en partie couvert par la mission Co3D, même si le fort poids de la défense et des industriels dans cette mission suscite des inquiétudes parmi les scientifiques quant à son adéquation à leurs besoins et à l'accès libre à la donnée. En parallèle, une option "stereo" a été proposée dans le cadre du concept SENTINEL-HR pour répondre à la demande en répétitivité de l'information topographique. Le CNES est également en possession d'une archive conséquente et inexploitée d'images stéréo acquises par le capteur SPOT5-HRS entre 2002 et 2015. L'ouverture de ces données d'archive à la communauté scientifique est une priorité : elle permettra d'élaborer une topographie de référence pour étudier la dynamique d'une surface planétaire en constante évolution. Enfin, le groupe souligne l'importance de la mise à disposition de l'ensemble des images (stéréo notamment) acquises par Pléiades, SPOT6, SPOT7 et des constellations commerciales via un catalogue en ligne. Nous recommandons également une coordination des efforts des différents groupes pour



l'exploitation des données de la mission laser altimétrique ICESat-2 (lancée fin 2018), à la fois pour la topographie des terres émergées et la bathymétrie. Pour le volet bathymétrique, les techniques Hyperspectrale (Mission Biodiversity) ou Lidar bathymétrique (ICESat-2) sont des opportunités à saisir pour combler le manque de données, principalement dans la zone littorale où les moyens nautiques conventionnels ou aériens, particulièrement onéreux, se limitent à échantillonner une faible partie des zones d'intérêt.

### 2.1.3. POLE FORM@TER

Le Pôle ForM@Ter vise à fournir à la communauté scientifique l'accès à des services et des outils performants pour accéder, traiter et analyser les données satellitaires et in-situ, ainsi que des produits dérivés sur la Terre solide et la Géodésie. D'une manière plus générale, ForM@Ter contribue à une structuration de la communauté TS au niveau national, nécessaire pour faire face aux nouveaux défis et aux changements rapides du traitement scientifique des données spatiales. Par exemple, le programme Copernicus et la stratégie long-terme d'acquisition et de diffusion gratuite des données Sentinel adoptée par l'ESA ont conduit ces dernières années à une rupture dans la façon de travailler des chercheurs. La masse de données générées et directement accessible (> 10 To/jour) offre des perspectives nouvelles. En raison des volumes de données en jeu et de la complexité du traitement, cette production de connaissances ne peut toutefois plus être menée au niveau d'une équipe de recherche ou d'un laboratoire sans l'appui d'infrastructures de recherche nationale ou européenne.

Pour exploiter pleinement les opportunités offertes par le programme Copernicus et l'émergence de constellations du *New Space*, l'élaboration et la mise en œuvre de stratégies novatrices adaptées à l'analyse de gros volumes de données en temps court sont indispensables. Ainsi, les recherches futures devront utiliser les techniques de fouille de données et d'intelligence artificielle (apprentissage profond, PCI, ACI), de combinaison d'observations (assimilation de données multi-capteurs, etc ...) en s'appuyant sur l'analyse et la modélisation des données Copernicus, de données de capteurs *in situ* et parfois de productions participatives (réseaux sociaux, *crowdsourcing*, etc ...). En Terre solide, comme dans les autres compartiments du système Terre, la modélisation physique et numérique joue un rôle croissant, soulignant le défi d'articuler données et modèles numériques. Au-delà de l'infrastructure de données et de services, le pôle doit s'interfacer avec des moyens/infrastructures de calcul numérique adaptés aux besoins (et au XXI siècle) et développer des outils pour exploiter ces données massives (IA).

Permettre aux chercheurs français de la communauté TS de rester dans la compétition mondiale implique de leur assurer un accès efficace à des plateformes performantes de traitement, stockage et diffusion des données, et leur apporter du soutien aux développements méthodologiques comme une expertise sur le traitement massif et la gestion du cycle de vie de la donnée, en particulier dans la démarche légitime vers la « FAIRisation » des données. Le groupe TS encourage donc le CNES à poursuivre, voire intensifier, son soutien au Pôle ForM@Ter. Le groupe recommande la prise en considération des besoins liés aux problématiques spécifiques du domaine, et à la structuration historique de la communauté Terre solide comme par exemple dans l'hébergement et le soutien du CNES aux services développés. Le groupe apprécie les efforts déjà engagés dans le cadre de collaborations avec d'autres structures, par exemple au sein de l'Infrastructure de Recherche « Data Terra » réunissant les quatre pôles (Aeris, ForM@Ter, Odatis et Théia) et recommande leurs renforcement.

## 2.2. AMELIORATION DE NOTRE CONNAISSANCE DES CHAMPS DE PESANTEUR ET MAGNETIQUE

### 2.2.1. GRAVIMETRIE

Les variations spatiales et temporelles du champ de gravité terrestre reflètent l'ensemble des variations de distribution des masses au sein du globe, à la fois aux échelles géologiques et aux échelles humaines. Aux longues échelles de temps, elles portent des empreintes des mouvements de convection profonde qui sous-tendent le volcanisme et les mouvements des plaques tectoniques en surface, et donnent lieu à des hétérogénéités de structure mantellique jusqu'à la limite avec le noyau. À l'autre extrémité du spectre, elles enregistrent les manifestations les plus catastrophiques de cette activité interne, les déformations de la Terre solide sous l'effet du déplacement des charges d'eau et de glace à sa surface, et toute la dynamique de circulation de l'eau sous ses différentes phases au sein du système climatique, y compris à des profondeurs peu accessibles par les autres types d'observations.

Cette richesse de la donnée gravimétrique explique le succès des missions GRACE et GOCE, le lancement de GRACE Follow-On en mai 2018 et de nombreux travaux de la communauté nationale et internationale pour concevoir de futures missions ou combinaisons de missions gravimétriques. Les observations de gravimétrie satellitaire contiennent des signatures de phénomènes associés à toutes les composantes du système Terre, et leur combinaison avec les données d'autres types de senseurs permet de lever les ambiguïtés en observation de la Terre. Par exemple, la combinaison avec les observations de déformations de la surface terrestre, différemment affectées par les redistributions de masse en profondeur, contraint la profondeur des sources et apporte une information unique sur la façon dont la Terre se déforme y compris en son intérieur, sous l'effet de charges internes et externes. La meilleure compréhension des événements catastrophiques et de l'évolution de notre environnement proche surface (en termes de risques naturels mais aussi de ressources en eau et d'impact des variations climatiques sur le cycle de l'eau), en lien avec la dynamique et la rhéologie profonde, requiert

l'observation des variations temporelles du champ de gravité terrestre sur des périodes longues. Les variations de gravité terrestre sont le seul senseur sur les mouvements asismiques en profondeur au sein du système Terre, qui échappent à tous les autres systèmes d'observation. Complétées par un suivi géométrique pour identifier la composante plus proche surface, elles offrent une possibilité unique pour suivre l'intégralité du mouvement des plaques et du manteau dans de larges volumes autour des frontières majeures, y compris avant une rupture géante comme cela a pu être observé récemment (séisme du Japon 2011). Pour la même raison, elles sondent les réserves en eau dans le sous-sol. Afin d'avoir accès à la dynamique de la Terre interne, aux grandes longueurs d'ondes spatiales et temporelles, il est nécessaire d'avoir des données de la meilleure qualité sur le long terme, avec une précision homogène. Pour les observations satellites, une partie des limitations de qualité des données est intrinsèquement liée à la configuration orbitale des missions actuelles (GRACE, GRACE-fo), tandis que d'autres limitations viennent de la qualité de la mesure.

Le groupe Terre solide demande en priorité le lancement de la mission MARVEL, qui propose des perspectives d'amélioration inédites en précision et en résolution via une amélioration des données de positionnement et de la configuration orbitale de la mission. Il en résultera un gain en résolution spatiale et temporelle, qui permettra de développer les applications en temps réel (suivi des inondations par exemple) et d'étendre les complémentarités avec les autres capteurs (altimétrie, GNSS). En outre, le concept de mission, unique dans sa conception qui combine une double constellation comprenant un satellite haut (reprenant le concept de la mission GRASP) et un satellite gravimétrique en orbite basse, répond ainsi à un double besoin de fournir un système de référence géodésique précis et des observations gravimétriques à haute résolution. Cette constellation à deux altitudes permet de lever une limite majeure des systèmes de type GRACE, à savoir les motifs d'erreurs le long des orbites qui limitent considérablement l'exploitation scientifique des modèles de géoïdes. Par exemple, dans les zones sismogènes, ces progrès permettront de suivre les mouvements sismiques et asismiques des plaques de la surface aux plus grandes profondeurs, associés à des séismes de Mw 7.8 (seuil de détection) à 7 (cible). Un tel suivi est indispensable pour comprendre si ces ruptures sont systématiquement précédées par des déformations profondes détectables. Un autre exemple concerne la séparation des signaux associés à la fonte des glaces actuelle et au rebond postglaciaire à partir des observations de gravimétrie spatiale, de géodésie spatiale et d'altimétrie satellitaire, qui permettra de nouvelles estimations des bilans de masse des calottes polaires (et leurs incertitudes). Enfin, l'amélioration en résolution donnera accès au suivi de bassins hydrologiques de taille moyenne (40 % à 85 % des bassins pour les configurations seuil ou cible, contre 10 % par GRACE).

En complément des observations spatiales, les mesures in situ au voisinage de la surface terrestre restent indispensables pour compléter le spectre des observations des petites aux grandes longueurs d'onde et à différentes échelles temporelles ou encore apporter une référence globale et absolue à toute observation spatiale. Le développement de nouvelles technologies de mesures du champ de gravité utilisant les atomes froids, d'ores et déjà éprouvées pour des mesures ponctuelles ou embarquées (bateau, avion) offre des perspectives inédites pour des observations nouvelles en particulier dans les zones de transition Terre-Mer, très mal cartographiées par les satellites ou encore sur des régions difficiles d'accès (zone montagneuses, zones polaires, régions volcaniques, etc.). Ces techniques en plein essor au niveau international vont donner accès pour la première fois à des mesures absolues sur de vastes zones et hors des régions émergées (campagnes marines ou aéroportées) créant ainsi un degré de précision et d'homogénéité unique entre observations spatiales et in situ. De telles technologies sont également déjà à l'étude pour la conception de nouveaux capteurs (gravimètres, accéléromètres) pour de futures missions spatiales. À noter que dans un contexte très compétitif au niveau international sur ces activités de R&D très prometteuses, les équipes françaises (dont le CNES) occupent actuellement une position de leadership qu'il convient de maintenir et de valoriser.

Enfin la complémentarité des missions via une collaboration internationale active, à l'image de ce qui a été réalisé pour la filière altimétrique, doit être soutenue.

### 2.2.2. MAGNETISME TERRESTRE

La description du champ magnétique a particulièrement progressé ces dernières années, grâce aux données satellitaires de Swarm. Les modèles les plus récents incorporent des données d'observatoires magnétiques et presque deux décennies de mesures satellitaires. La connaissance du champ magnétique est essentielle à la géolocalisation, la navigation, la météorologie de l'espace et la prédiction des flux de particules chargées qui pénètrent l'atmosphère et perturbent les télécommunications. L'assimilation de données satellitaires dans des modèles numériques de dynamos permet de mieux comprendre la physique des variations du champ magnétique terrestre et de quantifier l'évolution passée et future des grandes caractéristiques du champ. L'accumulation pluri-annuelle à décennale d'informations à échelle globale a permis d'obtenir des modèles de haute précision et de haute résolution du champ magnétique. Au niveau du manteau, ces modèles viennent compléter la tomographie sismique pour décrire la structure du manteau. Au niveau crustal, c'est la structure magnétique de la croûte dont la connaissance est révolutionnée. Parce que ces structures dépendent de l'âge de la croûte, des mouvements tectoniques, des variations de flux de chaleur, de la composition minéralogique, et de son épaisseur, elles permettent de mettre en évidence les paramètres géophysiques clés qui régissent la structure et l'état thermique de la lithosphère terrestre. La continuité des observations de haute qualité en magnétisme, nécessaire à l'amélioration de notre connaissance de l'intérieur profond de la Terre, est une priorité du groupe TS.

La mission Swarm lancée par l'ESA en 2013 a contribué à fédérer les communautés du géomagnétisme interne et externe. Le projet de mission NanoMagSat propose l'envoi d'un nanosatellite avec une période de



recouvrement sur la mission Swarm. Outre l'amélioration du retour scientifique de Swarm, ce projet offre aussi la possibilité de mesurer le champ magnétique sur le long terme depuis l'espace et à moindre coût. Ce satellite est donc aussi un démonstrateur pour une possible future constellation.

## 2.3. QUESTIONS TRANSVERSES

### 2.3.1. SYSTEME TERRE ET CHANGEMENT GLOBAL

Parce que l'essentiel des phénomènes géophysiques sont associés à des changements dans la distribution de masse de la Terre et à des déformations de sa surface, l'observation de la Terre solide donne accès à des informations sur la dynamique de la Terre, comme système complexe qui inclut et couple l'atmosphère, l'océan, la cryosphère, l'hydrosphère. En cela, le suivi précis, continu et homogène de la forme de la Terre et de son champ de pesanteur est un outil vital pour la compréhension des grands échanges à l'échelle du système Terre. En particulier, les mesures géodésiques apportent de multiples données fondamentales pour le suivi du changement global : fonte des glaces, niveau des mers, suivi des ressources en eau,... La mission gravimétrique GRACE a révolutionné l'étude du bilan de masse des calottes polaires (Antarctique et Groenland) et des grands glaciers de l'Arctique. Elle s'avère complémentaire des autres techniques (altimétrie radar ou différence de MNTs) pour affiner les estimations de la contribution de la cryosphère à la hausse du niveau moyen des mers. Aujourd'hui la principale source d'incertitude sur les bilans déduits de GRACE est la méconnaissance du rebond post-glaciaire (GIA, Glacial Isostatic Adjustment). Une bonne modélisation du GIA est essentielle, à la fois pour corriger les pertes de masse observée par GRACE (et bientôt par GRACE follow-on) mais également pour affiner les projections de la distribution spatiale (elle sera très hétérogène) de la hausse future du niveau des mers. Une mission comme MARVEL est donc essentielle pour progresser sur ces questions à fort enjeux scientifiques et sociétaux. Pour les régions de montagne, où les données GRACE comme l'altimétrie radar sont difficilement exploitables, c'est le lancement d'une mission "topographie" fournissant des MNT précis, réguliers (pas de temps saisonnier) et sur des zones vastes qui permettra de mieux contraindre les pertes de masse des glaciers et les évolutions des stocks saisonniers de neige.

### 2.3.2. LES RISQUES

À des échelles temporelles et spatiales plus courtes, l'activité géologique de la Terre solide se manifeste aussi par des phénomènes transitoires et extrêmes - séismes, tsunamis, éruptions volcaniques et glissements gravitaires - venant perturber le système, parfois durablement pour les événements les plus intenses. Leur impact sociétal implique de développer une surveillance permanente et fiable. Le cycle sismique et les mécanismes de préparation et de déclenchement des éruptions volcaniques sont aujourd'hui mieux compris, grâce notamment aux observations d'interférométrie spatiale (InSAR) et GNSS. Les satellites Sentinel contribuent à la compréhension fine du cycle sismique via la mesure des déformations inter-, co- et post-sismiques au niveau des zones tectoniquement actives, grâce à un temps de retour réduit. Le développement des techniques de géodésie de fond de mer doit se poursuivre. En complément, pour les tsunamis, il faut se tourner vers d'autres méthodes, capables de mesurer les déformations de la surface de l'océan avec une précision centimétrique et une couverture spatiale et temporelle homogène. La détection ionosphérique des tsunamis a ouvert une voie prometteuse avec en particulier la luminescence de l'ionosphère qui peut être observée avec une caméra optique équipée de filtres. Ce concept est à l'origine du projet de satellite IonoGlow. La phase 0 a permis de dégager des paramètres de pré-dimensionnement tels que l'orbite géostationnaire pour permettre un champ de vue suffisant. Cette étude a aussi démontré l'utilité des observations multi-longueur d'onde (visible, infrarouge et ultra-violet). Un futur système d'alerte tsunami basé sur ces méthodes optiques impose de mieux connaître les systèmes de détection airglow (faible luminescence de la haute atmosphère) des ondes de gravité et de continuer les travaux engagés sur la modélisation quantitative de la signature airglow des tsunamis et sur l'évaluation de l'impact du bruit de fond. Une collaboration avec les communautés s'intéressant à la météorologie de l'espace et à la chimie de l'atmosphère est nécessaire pour précisément évaluer les niveaux de détectabilité des tsunamis et la fiabilité des méthodes d'observation ionosphérique.

### 2.3.3. LE LITTORAL

Le littoral est un thème qui a été abordé par le groupe TS, principalement sous l'angle de la quantification des transferts de matière sur le continuum Terre - Mer. Le potentiel des données spatiales est en effet important, par exemple pour mesurer les évolutions morphodynamiques des environnements littoraux (falaises, plages, estuaires) en réponse aux forçages météo-marins. Des données topo-bathymétriques sont alors requises, tant à très haute résolution spatiale (meilleure que le mètre) à l'échelle des sites d'études, qu'à l'échelle mondiale. Les données stéréo-photogrammétriques, Lidar et hyperspectrales n'ont pas encore révélé tout leur potentiel dans ce domaine à très fort enjeu sociétal.

## 2.4. PRIORITES DU GROUPE TERRE SOLIDE

Dans ce contexte, le groupe TS souhaite mettre en avant 4 types de priorités :

- **Missions spatiales.** Le groupe soutient fortement deux missions spatiales : **MARVEL** (mission multi-techniques en géodésie-gravimétrie, permettant un bond en avant de la qualité en positionnement et du suivi du champ de gravité), et **NanoMagSat** (nanosatellite dédié à l'amélioration de la connaissance sur la dynamique du noyau, la conductivité dans le manteau, le magnétisme de la croûte, et la météorologie de l'espace). Le groupe soutient également le développement du projet **IonoGlow** (mission dédiée au suivi des tsunamis par imagerie de la signature airglow et à l'étude des interactions atmosphère/ionosphère).
- **Infrastructures sol.** Le groupe recommande le déploiement de l'Observatoire Géodésique Fondamental (OGF) de Tahiti, infrastructure géodésique unique dans le Pacifique Sud, combinant les quatre techniques géodésiques fondamentales, crucial pour améliorer la couverture du système de référence terrestre.
- **R&D.** Le groupe souligne l'importance de maintenir l'excellence française dans le développement de capteurs innovants pour la gravimétrie spatiale (accéléromètres et gravimètres atomiques).
- **Données et calculs.** Un accès amélioré aux données d'archives (multi-capteurs et multi-agences) et à des moyens de calculs adaptés aux traitements de données massives. Dans cet objectif le groupe souhaite le développement du Pôle ForM@Ter afin de permettre de recenser les besoins et de coordonner les efforts nécessaires.

## 2.5. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation	R&T associée	Thème scientifique
<b>Systemes de référence et positionnement millimétrique</b>	MARVEL		<i>Précision et stabilité du système de référence</i>
<b>Champ de pesanteur</b>	MARVEL COPERNICUS/ESA	Accéléromètres et gravimètres atomiques	<i>Evolution du système climatique, dynamique profonde de la Terre</i>
<b>Systemes de référence et positionnement millimétrique</b>	OBSERVATOIRE FONDAMENTAL DE TAHITI		<i>Précision et stabilité du système de référence</i>
<b>Champ magnétique</b>	NanoMagSat (ESA SmallSat)		<i>Dynamique du noyau, conductivité dans le manteau, magnétisme de la croûte, spaceweather</i>
<b>Airglow associé aux tsunamis</b>	IONOGLOW Coopération Inde, Singapour, USA		<i>Détection et imagerie des tsunamis</i>