

# GROUPE THÉMATIQUE TERRE SOLIDE

Pascal Allemand, Sylvain Bonvalot, Rodolphe Cattin (président entrant), Patrick Charlot, Olivier de Viron (président sortant), Michel Diament, Bénédicte Fruneau, Marianne Greff, Lydie Gailler, Nicolas Gillet, Marion Jaud, Cécile Lasserre, Mioara Manda, Isabelle Panet, Laurent Métivier, Erwan Pathier, Félix Perosanz (thématicien Cnes), Lucie Rolland, Séverine Rosat, Alvaro Santamaria, Lucia Seoane, Erwan Thébault, Guy Wöppelmann

Basée sur des sciences fondamentales, la thématique « Terre solide » a pour objectif l'étude de notre planète, i.e. sa formation et son évolution, sa composition, sa dynamique interne et les couplages avec les enveloppes externes que sont l'atmosphère, les océans, la cryosphère et l'hydrosphère. Parallèlement à ces enjeux scientifiques, elle relève des défis sociétaux majeurs : le suivi du changement climatique (niveau des mers, fonte des glaces), les besoins et la transition énergétiques (hydrocarbures, géothermie), les ressources en eau et en minerais (construction, batterie, high-tech), et les risques naturels (instabilité gravitaire, séisme, tsunami, volcan).

Dans ce contexte, les observations spatiales sont incontournables. Leur caractère global, homogène et de précision continuellement accrue, permet de compléter les mesures au sol. De plus, elles fournissent un suivi temporel continu et fréquent du système Terre avec, pour certaines, des archives couvrant plusieurs décennies. À titre d'exemple, on peut mentionner :

- les observations géodésiques qui permettent d'étudier les variations de rotation de la Terre et de fournir un référentiel mondial,
- les missions magnétiques et gravimétriques qui contribuent à caractériser la composition et la forme de notre planète, éléments clés pour étudier sa dynamique,
- les mesures altimétriques qui fournissent des informations sur les reliefs terrestres, les glaciers et le niveau des océans,
- les données d'imagerie qui permettent de mesurer les mouvements associés aux aléas naturels et aux transferts de masse.

Couvrant des échelles spatiales et temporelles complémentaires, les mesures au sol, les acquisitions drones, bateaux et aéroportées, et les observations spatiales sont analysées conjointement. Seule une telle démarche, couplée à une approche combinant différents types de données, permet de compenser la difficulté liée à l'absence d'observation directe de l'intérieur de la Terre. L'analyse et l'interprétation de ces jeux de données complexes et hétérogènes nécessitent des développements numériques et des moyens de calcul conséquents. La communauté est fortement impliquée dans ces développements avec le soutien du Cnes via le pôle ForM@Ter de l'infrastructure de recherche Data Terra, les appels à projets et les financements de thèses et postdocs.

## 1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

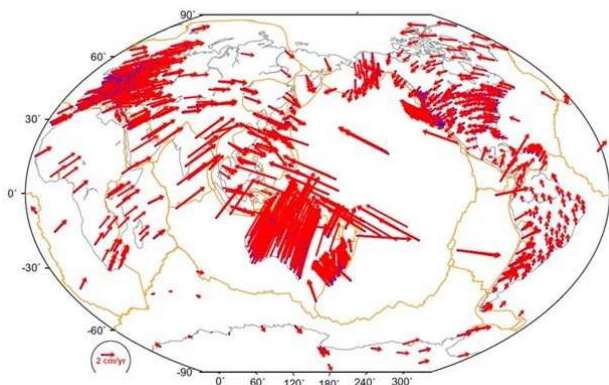
### 1.1. PRINCIPAUX RÉSULTATS SCIENTIFIQUES

#### 1.1.1. NOUVEAU RÉFÉRENTIEL INTERNATIONAL

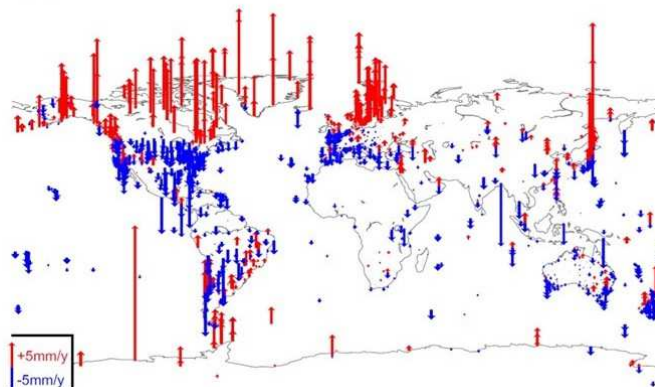
Pour décrire et modéliser le fonctionnement de notre planète, il est indispensable de définir un système de référence terrestre. Les campagnes de réanalyse des mesures de géodésie spatiale ont mobilisé des dizaines d'équipes dans le monde et ont abouti à l'ITRF2020 (International Terrestrial Reference Frame, 2020 realization), qui est la réalisation la plus performante à ce jour en termes de couverture, de densité, de précision et de stabilité. Les équipes françaises ont joué un rôle majeur, en traitant l'ensemble des données des quatre techniques, qui couvrent des périodes de 28 ans

(DORIS<sup>1</sup>), 27 ans (GNSS<sup>2</sup>), 41 ans (VLBI<sup>3</sup>) et 38 ans (SLR<sup>4</sup>), et en pilotant l'ITRF2020. Cette nouvelle version (Fig. 1) apporte des améliorations significatives, en intégrant les mouvements non-linéaires des stations liés aux variations saisonnières et aux déformations post-sismiques. La précision de l'origine long-terme de l'ITRF2020 et son évolution temporelle sont évaluées respectivement à 5 mm et 0,5 mm/an, comparables au précédent ITRF mais en étant plus robuste et précis car intégrant plus de sites sur une période de temps plus longue.

(a) Vitesses horizontales



(b) Vitesses verticales



**Fig. 1. Référentiel terrestre international.** Vitesses horizontales (a) et verticales (b) des sites de l'ITRF2020 ayant une erreur formelle inférieure à 1 mm/an. © Altamimi et al. (2023).

### 1.1.2. DYNAMIQUE DE LA TERRE

Complémentaires des mesures au sol, les observations spatiales magnétiques (**Swarm**<sup>5</sup>) et gravimétriques (**GRACE**<sup>6</sup> (-FO<sup>7</sup>), **GOCE**<sup>8</sup>) permettent d'imager l'intérieur de la Terre et ainsi mieux comprendre son fonctionnement.

Les secousses magnétiques enregistrées sur les vingt dernières années ont été reliées à des ondes hydro-magnétiques de période interannuelle se propageant dans le noyau. Ce résultat a des répercussions tant sur notre compréhension de la dynamique du noyau que sur la géodynamique globale comme la présence ou non d'une couche stratifiée à la surface du noyau. L'analyse des observations des champs gravimétrique, magnétique et des mesures de la rotation terrestre indiquent une oscillation périodique de 6 ans. Les deux dernières ont été reliées à la dynamique du noyau ; l'origine du signal gravimétrique, et son lien aux autres observables, reste ouverte.

Des ondulations périodiques de longueur d'onde d'environ 2 000 km dans le champ de gravité et la topographie des fonds océaniques ont été mises en évidence (Fig. 2). Ces ondulations alignées avec le mouvement actuel des plaques, dans les océans Pacifique et Indien, coïncident avec des zones sismiques lentes dans le manteau supérieur. Ces observations suggèrent la présence d'une convection thermo-chimique secondaire sous les bassins océaniques et l'existence d'une zone de transition étendue.

Les données satellitaires et les mesures au sol ont également permis des avancées à l'échelle lithosphérique, comme la mise en évidence de variations latérales de géométrie des structures le long de l'arc Himalayen, potentielles barrières à la propagation d'une rupture sismique.

<sup>1</sup> Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite.

<sup>2</sup> Global Navigation Satellite System qui intègre les systèmes GPS (Global Positioning System, Etats-Unis), GLONASS (Global Navigation Satellite System, Russie), BDS (BeiDou Navigation Satellite System, Chine) et Galileo (Europe).

<sup>3</sup> Very Long Baseline Interferometry.

<sup>4</sup> Satellite Laser Ranging.

<sup>5</sup> Constellation de trois satellites.

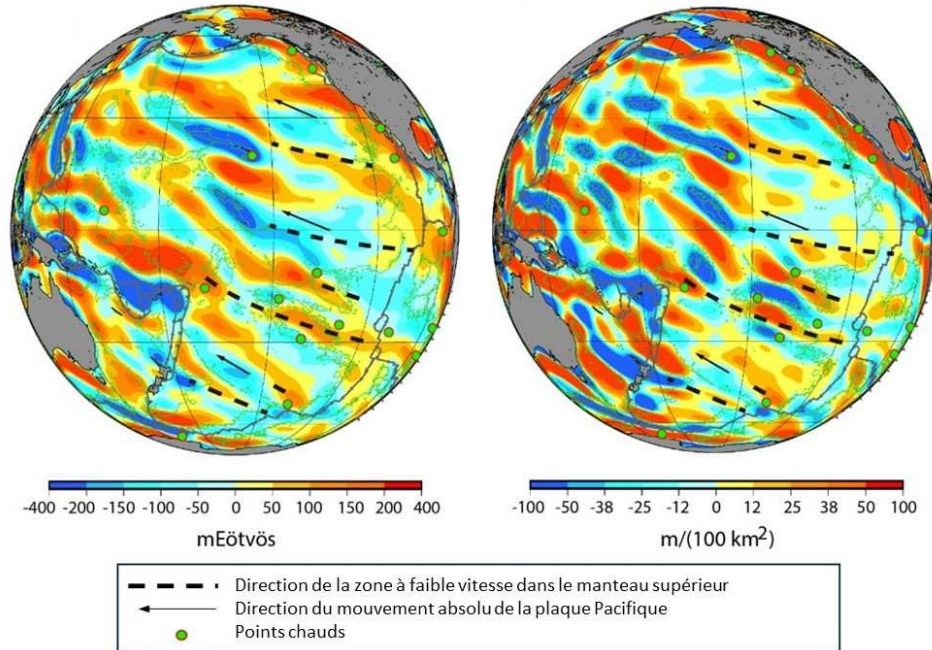
<sup>6</sup> Gravity Recovery and Climate Experiment.

<sup>7</sup> Follow-On.

<sup>8</sup> Gravity field and Ocean Circulation Explorer.

(a) Gradients de gravité GRACE

(b) Variations de pente des fonds océaniques



**Fig. 2. Dynamique mantellique.** Ondulations alignées avec la direction absolue du mouvement de la plaque Pacifique dans (a) les gradients de gravité longitudinaux filtrés à 1100 km et (b) les dérivées secondes de la topographie des fonds océaniques. © Panet et al. (2022).

### 1.1.3. AMÉLIORATION DU SUIVI ET DE LA COMPRÉHENSION DES ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES

Les cinq dernières années marquent une évolution dans l'étude des événements extrêmes. Si les approches classiques ont montré leur efficacité pour caractériser rapidement des séismes (Taïwan, Haïti, Grèce, Turquie-Syrie, Maroc), de nouvelles études se sont focalisées sur la déformation avant et après ces événements extrêmes. L'utilisation conjointe de mesures InSAR<sup>9</sup> **Sentinel-1** et GNSS a permis d'améliorer la compréhension des séismes lents et la répartition des hétérogénéités frictionnelles le long des zones de subduction. En domaine continental, à l'échelle de l'arc Alpin, les mesures InSAR suggèrent une vitesse de surrection pouvant atteindre localement plusieurs mm/an. La mise en place du service FLATSIM<sup>10</sup> a permis d'obtenir des séries temporelles de déplacement, sur de larges zones géographiques pouvant dépasser le million de km<sup>2</sup>. À l'échelle de l'Est-Tibet (Fig. 3), le champ de vitesse horizontale apparaît comme largement dominé par le signal inter- et post-sismique le long de grandes failles décrochantes, alors que le champ vertical est principalement affecté par des processus de surface liés à la dégradation du pergélisol et aux fluctuations hydrologiques interannuelles.

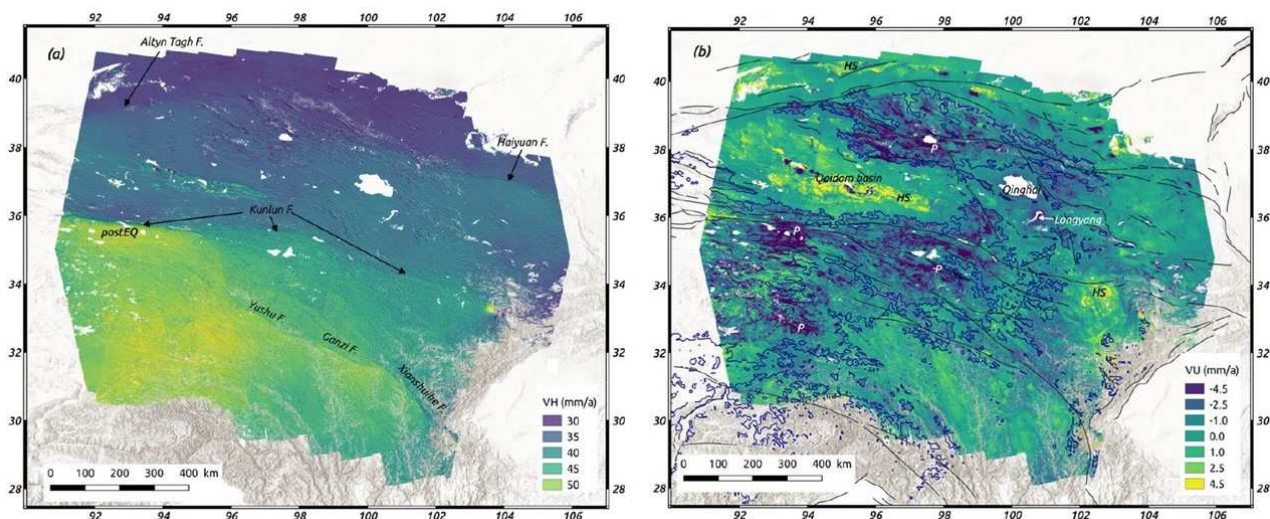
Présenté dans la prospective 2019, la possibilité de détecter des signaux gravimétriques pré-sismiques court-terme (environ 2 mois) d'origine profonde a été confirmée au cours de ce quinquennal. Ces signaux reflètent probablement une déformation des plaques subduites dans le manteau supérieur, dont la migration vers la surface pourrait avoir contribué à créer des conditions favorables au déclenchement et à la propagation de ruptures géantes.

L'éruption volcanique de Hunga Tonga et les séismes de Sulawesi et de Turquie-Syrie ont également marqué la période récente en permettant de décrire la chronologie des émissions d'énergie volcanique ou sismique brutalement injectée dans l'atmosphère via la mesure du contenu électronique total extrait des données GNSS.

<sup>9</sup> Interferometric Synthetic Aperture Radar.

<sup>10</sup> ForM@Ter LArge-scale multi-Temporal Sentinel-1 InterferoMetry.





**Fig. 3. Déplacement sur l'ensemble de l'Est-Tibet.** Champs de vitesse de déplacement horizontal (à gauche) et vertical (à droite) obtenu par l'analyse massive de séries temporelles InSAR **Sentinel-1** générées par le service FLATSIM. © Lemrabet et al. (2023).

#### 1.1.4. SURFACE DE LA TERRE : UNE ZONE D'INTERACTIONS ENTRE TERRE INTERNE ET ENVELOPPES EXTERNES

Longtemps limités à l'étude de l'intérieur de la Terre, les contours scientifiques « Terre solide » évoluent en prenant de plus en plus en compte les interactions avec les enveloppes externes. L'oscillation périodique de 6 ans décrite dans la section 1.1.2 pose la question d'un lien entre dynamique du noyau et variations climatiques interannuelles.

La comparaison du champ de vitesse global de l'ITRF2020 avec les variations d'ellipticité du géoïde a montré l'impact prépondérant de la fonte des glaces liée au dérèglement climatique sur les déformations globales de la Terre de ces vingt dernières années. Une analyse détaillée des mesures GNSS a démontré l'influence du chargement apériodique atmosphérique et océanique, pouvant atteindre 1,5 mm/an sur la composante verticale des séries temporelles.

La possibilité de disposer de données topographiques de résolution métrique via la mission **Pléiades**, a permis des avancées significatives en géomorphologie. Les données gravimétriques **GRACE (-FO)** ont été utilisées pour détecter la charge sédimentaire à l'embouchure de grands fleuves.

## 1.2. BILAN PROGRAMMATIQUE

### 1.2.1. RETOURS SUR LES PRIORITÉS 2019 DE MISSIONS SPATIALES

Deux missions spatiales étaient prioritaires lors de la prospective du Havre :

- la mission **MARVEL** avait pour double objectif d'améliorer (1) le suivi du champ de pesanteur et (2) la stabilité du système de référence terrestre, pour atteindre une précision millimétrique en positionnement par l'équipement d'un ou plusieurs satellites des quatre techniques géodésiques : SLR, DORIS, VLBI, GNSS ;
- la seconde priorité affichée était la mission magnétique **NanoMagSat**. Cette mission était un projet de 3 nanosatellites visant à compléter les observations de la mission **Swarm**. Deux des trois satellites à orbite inclinée, mais circulaire, devaient permettre une meilleure couverture temporelle locale et un meilleur suivi des variations temporelles globales rapides du champ géomagnétique.

Pour la mission **MARVEL**, une phase-0 a été réalisée mais la proposition a finalement été abandonnée au bénéfice d'une plus grande implication des chercheurs français dans la mission gravimétrique **MAGIC** et la mission de positionnement **GENESIS** (voir chapitre 3).

Le projet **NanoMagSat** a été définitivement validé en mars 2024. Cette mission permettra l'étude du champ magnétique interne (noyau et lithosphère), des courants électriques circulant dans

l'ionosphère, tant globalement que localement, des signaux magnétiques produits par des courants magnétosphériques à grande échelle, des couplages entre la magnétosphère et l'ionosphère, la caractérisation du signal magnétique des marées océaniques et ceux des courants induits dans le manteau terrestre.

### 1.2.2. RETOURS SUR LES AUTRES PRIORITÉS

Le groupe thématique avait également donné des recommandations concernant les infrastructures au sol, l'instrumentation et l'accès aux données et aux moyens de calcul :

- l'observatoire de Tahiti est un site de référence géodésique fondamental, régi par une convention entre la Nasa, le Cnes et l'université de la Polynésie française. Il regroupe un ensemble d'observations géodésiques et géophysiques (station laser, stations DORIS et GNSS, gravimètre, sismomètre). Il est labellisé « site instrumenté » par le CNRS. Il a contribué à toutes les réalisations de l'ITRF et fournit des données à cinq services internationaux. Suite au constat de manque d'infrastructure VLBI dans le Pacifique sud, la communauté géodésique internationale (AIG) a soutenu le projet d'un nouvel observatoire géodésique combinant les quatre techniques géodésiques fondamentales, crucial pour améliorer la couverture du système de référence terrestre. Cet observatoire serait doté d'une station de télémétrie laser nouvelle génération (SLR) et d'une antenne VLBI, qui doit être financée par la Nasa, en complément d'autres instruments (GNSS, DORIS), dans un cadre collaboratif international ;
- La gravimétrie quantique a ouvert une nouvelle voie pour mesurer de façon inédite les variations spatiales et temporelles du champ de pesanteur par des mesures absolues et à haute résolution temporelle (> 1Hz) ;
- le développement du pôle ForM@Ter était une priorité pour répondre aux besoins liés à l'accès aux données d'archives (multi-capteurs et multi-agences) et aux moyens de calculs.

Depuis 2021, le projet d'observatoire géodésique et géophysique fondamental de Tahiti a été relancé. La Nasa a confirmé son souhait d'installer sur le site une antenne VLBI. L'attribution d'une parcelle du domaine a été validée par le territoire, cependant le financement du projet reste à consolider.

Sous l'impulsion de la commission européenne, les agences spatiales française et allemande ont initié le projet **CARIOQA** de spatialisation d'un accéléromètre quantique dont la phase A a démarré en 2024.

Le pôle ForM@Ter est devenu un acteur incontournable de la communauté. Fortement soutenu par le Cnes et le CNRS. Ce pôle met aujourd'hui à disposition un catalogue de données. Il offre des services de visualisation des données GNSS et de calcul à la demande des déformations du sol. Il permet un accès simplifié et unique à plusieurs sites de données et d'outils de calculs portés notamment par les infrastructures de recherche Epos-France et Data Terra et les services nationaux d'observation (INSU-CNRS).

## 2. PRINCIPALES QUESTIONS, DÉFIS SCIENTIFIQUES ET SOCIÉTAUX

Quatre grands enjeux structurent la recherche « Terre solide » : le référencement géodésique (TS.1), la géodynamique interne (TS.2), les aléas naturels (TS.3), et les interactions Terre interne – enveloppes externes (TS.4).

### 2.1. AMÉLIORATION DU RÉFÉRENCEMENT GÉODÉSIQUE (ENJEU TS.1)

La géodésie spatiale joue un rôle central dans de nombreuses applications scientifiques et sociétales grâce au référencement précis de points fondamentaux matérialisés par les stations DORIS, GNSS, SLR et VLBI dans le repère de référence ITRF. Elle permet de quantifier les déformations de la Terre et est cruciale pour la détermination de l'évolution du niveau moyen des mers. La réalisation d'un repère de référence terrestre aussi précis et stable que possible est

indispensable. La cible à atteindre pour les futurs ITRF, telle que mise en avant par l'association internationale de géodésie, est une exactitude de 1 mm et une stabilité de 0,1 mm/an.

Il faut donc gagner un peu plus d'un demi ordre de grandeur par rapport à la situation actuelle (ITRF2020) pour répondre aux exigences fixées. Atteindre cet objectif passe par une amélioration des infrastructures au sol, du lien entre les quatre techniques de mesure, ainsi que de la modélisation et des méthodes de traitement de données combinées.

## **2.2. MIEUX COMPRENDRE LA DYNAMIQUE INTERNE DE NOTRE PLANÈTE (ENJEU TS.2)**

L'absence de mesure directe de l'intérieur de notre planète implique que de nombreuses questions de premier ordre sur sa dynamique interne demeurent ouvertes : quelle est la structure thermique et compositionnelle de la Terre ? Quelles sont les interactions entre les couches solides de la Terre et son noyau fluide ? Quelle est la dynamique du noyau externe à courte échelle de temps ? La dynamique du noyau peut-elle affecter le climat ? Quelle est la viscosité de la couche à la limite noyau-manteau ? Quelle est la nature de la convection mantellique ? Quels sont les couplages entre les plaques plongeantes et le manteau ?

Les défis scientifiques sont nombreux et concernent l'imagerie à haute résolution spatiale, la capacité à séparer les différentes sources magnétiques, géodésiques et gravimétriques (superficielles et profondes, externes et internes), la mise en œuvre de méthodes pour interpréter conjointement des observations variées.

La plupart des sources magnétiques ne peuvent être mises en évidence que par une accumulation de données sur un temps long (correspondant au moins au cycle solaire) et parfois à des altitudes et des échelles variées afin d'amplifier le rapport signal sur bruit des structures et de les séparer des signaux transitoires. De même en gravimétrie, il est indispensable d'acquérir des observations permettant de distinguer les signaux court-terme (hydrologie, séisme) et long-terme (structure) à différentes altitudes. Atteindre ces objectifs requiert des observations spatiales pérennes sur plusieurs décennies et des mesures au sol, par drone et embarquées (bateau, avion, ballon).

## **2.3. AMÉLIORATION DU SUIVI ET DE LA COMPRÉHENSION DES ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES (ENJEU TS.3)**

Mieux estimer les aléas naturels liés aux événements extrêmes (séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, instabilités gravitaires) reste un défi scientifique majeur pour la communauté « Terre solide ». L'enjeu sociétal est évident, et malgré d'intenses recherches menées depuis plusieurs décennies, de nombreuses questions demeurent ouvertes : Quels sont les processus menant à la rupture sismique ou au glissement gravitaire ? Quelle est l'influence des déformations aismiques et transitoires sur l'état de contrainte des zones de faiblesses ? Quelles sont les interactions entre glissements lents le long des failles et séismes ? Comment améliorer le suivi temporel haute fréquence des éruptions volcaniques ? Quels sont les mécanismes physiques permettant le suivi des tsunamis depuis l'espace ?

Pour l'ensemble des aléas, le principal défi consiste en la détection de signaux précurseurs ou initiateurs, par nature peu fréquents et de faible amplitude, souvent mélangés à des signaux pouvant être associés à des perturbations de surface, naturelles ou anthropiques. Du point de vue des observations spatiales, cela implique des temps de revisite fréquents, et l'acquisition de séries temporelles longues et précises permettant de discriminer l'origine des signaux observés.

Pour répondre à ce défi, il est indispensable de combiner des observations acquises à différentes altitudes (sol, aéroportée, spatiale) et de nature variée (sismologique, géodésique, thermique, gravimétrique, ionosphérique).

## **2.4. VERS UNE VISION INTÉGRÉE DES INTERACTIONS ENTRE TERRE INTERNE ET ENVELOPPES EXTERNES (ENJEU TS.4)**

L'étude des interactions Terre interne – enveloppes externes constitue une thématique pluridisciplinaire émergente. Les recherches associées concernent entre autres, les rétroactions entre l'ajustement isostatique et la fonte récente des calottes glaciaires, les transferts de masse à la surface de la Terre et l'occurrence des séismes, la déformation crustale produite par des variations

du niveau des nappes phréatiques, les effets du volcanisme sur la chimie atmosphérique et le bilan radiatif, ou les interactions entre les champs magnétiques d'origine interne et externe et leur effet sur l'atmosphère et le monde vivant.

Les enjeux sociétaux sont considérables et requièrent des recherches originales sur la séparation des sources et le développement d'approches combinant des mesures multi-thématiques, multi-techniques et multi-solutions. À titre d'exemple, l'analyse conjointe des observations spatiales des champs magnétiques et gravimétriques, et des mesures de la rotation terrestre indiquent une oscillation périodique de 6 ans liée à la dynamique du noyau (voir section 1.1.2). Une période similaire a également été détectée pour plusieurs paramètres caractérisant les enveloppes externes comme le taux de variation du niveau moyen des mers, la température moyenne de surface, les précipitations, le bilan de masse des glaciers et calottes glaciaires, ou le stockage d'eau. Cette corrélation peut être fortuite, mais peut également suggérer un couplage entre Terre interne et climat, dont les mécanismes sont aujourd'hui largement méconnus.

### **3. RECOMMANDATIONS DU GROUPE**

#### **3.1. MISSIONS SPATIALES ET BALLONS**

Aucune mission d'imagerie n'est indiquée dans ce paragraphe. Le groupe souligne cependant l'importance pour la communauté de maintenir une forte vigilance sur les programmes Copernicus afin qu'ils restent en adéquation avec ses besoins, notamment sur les paramètres, la fréquence d'acquisition et la qualité des images.

##### **3.1.1. 4D-EARTH**

Le groupe soutient le projet de mission **4D-Earth** qui permettra un suivi de l'évolution de la topographie des terres émergées, élément indispensable pour aborder les enjeux TS.3 et TS.4. Cette mission pérennisera les observations de type **Pléiades** ou **CO3D**. Cette mission est décrite en détail dans la thématique « Surface continentale ».

##### **3.1.2. CARIOQA (COLD ATOM RUBIDIUM INTERFEROMETER IN ORBIT FOR QUANTUM ACCELEROMETRY)**

**CARIOQA** est un projet du programme Horizon Europe, financé par la commission européenne, et piloté par le Cnes et l'agence spatiale allemande (DLR). L'objectif est d'embarquer et de tester un accéléromètre atomique dans l'espace. Il permettra de démontrer les caractéristiques clés de l'interférométrie atomique spatiale, telles que des temps d'interrogation de plusieurs secondes et la compensation active des rotations. Cette démonstration technologique ouvrira la voie à des missions spatiales ambitieuses basées sur l'interférométrie à atomes froids, permettant ainsi de préparer les missions gravimétriques à l'horizon 2035. La phase A de ce projet a démarré en 2024. L'intérêt pour la communauté « Terre solide » est la possibilité d'accéder à des mesures absolues et globales du champ de pesanteur et de ses gradients.

##### **3.1.3. GENESIS (GALILEO INNOVATIVE SPACE SERVICE SOLUTION)**

**GENESIS** est une mission Esa du programme FutureNAV pour le positionnement précis. Cette mission multi-techniques en géodésie, combinant GNSS, DORIS, SLR, et VLBI, doit permettre un bond en avant de la qualité du référentiel terrestre et, plus globalement du positionnement et des applications qui en dépendent. L'objectif est de permettre la réalisation du référentiel terrestre avec une précision de 1 mm et une stabilité à long terme de 0,1 mm/an, selon les recommandations des instances internationales (enjeu TS.1). La mission **GENESIS** a été approuvée en 2022. Cependant, parmi les instruments embarqués, les récepteurs DORIS font face à un problème d'obsolescence des composants électroniques. Via son soutien à la mission **GENESIS**, le groupe recommande le financement du projet **DORIS-NEO** de développement d'un nouveau récepteur qui permettra d'équiper les futures missions en proposant des performances étendues.

### 3.1.4. **MAGIC (MASS-CHANGE AND GEOSCIENCES INTERNATIONAL CONSTELLATION)**

Le groupe soutient fortement la mission **MAGIC**. Par rapport aux missions précédentes, l'amélioration des performances de **MAGIC** repose sur un concept de constellation avec un double tandem de satellites gravimétriques, là où **GRACE (-FO)** sont des tandems simples. Il est prévu que l'une des deux paires de satellites soit implémentée par l'Esa, et l'autre dans le cadre d'un partenariat Nasa/DLR. Chaque tandem est formé de deux satellites se poursuivant sur la même orbite basse. La mesure de la distance inter-satellite, effectuée grâce à un lien laser, est sensible aux variations du champ de pesanteur entre les deux satellites, tandis que des mesures accélérométriques permettent la correction précise des contributions des forces non-gravitationnelles. Les deux tandems sont placés sur des orbites d'inclinaisons différentes, ce qui est un facteur clé dans la réduction des artefacts d'aliasing dans les géoïdes obtenus, en plus de l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage temporel par rapport à un simple tandem. En effet, ces inclinaisons différentes permettent d'améliorer l'isotropie des mesures d'inter-distances, celles-ci ne se faisant pas seulement dans une direction approximativement Nord/Sud mais aussi selon des directions obliques. Il en résulte une amélioration attendue des performances d'un facteur environ 10. À titre d'illustration, les données **MAGIC** permettront de chercher des signaux précurseurs de séismes de magnitude 7.5 et plus (environ 55 événements sur 10 ans), au lieu de 8.5 et plus (environ 1-2 événements sur 10 ans) avec **GRACE (-FO)**. L'augmentation de la fréquence d'acquisition, l'amélioration des performances et la pérennisation des observations du champ de pesanteur étendra considérablement le champ des applications pour l'étude de la « Terre solide » (enjeux TS.2, TS.3 et TS.4), mais également pour les thématiques « Surface continentale » et « Océan ». Approuvée en 2022, cette mission fait face à des difficultés de budget côté Esa. Le démarrage de la phase-B1 a eu lieu en 2024 et celui de la phase-B2 reste à valider à l'automne 2024.

### 3.1.5. **NANOMAGSAT**

**NanoMagSat** a pour objectif contractuel avec l'Esa d'avoir une constellation en opération pour au moins 3 ans à partir de début 2028. Au-delà de cette date, le groupe souligne l'importance de maintenir et de renforcer cette constellation de manière pérenne (enjeux TS.2, TS.3 et TS.4), via la possibilité de relancer des satellites comparables à bas coût.

### 3.1.6. **GRAVMAGBALLON**

Le groupe considère comme prioritaire le projet de mission ballon **GravMagBallon** qui permettra d'acquérir des données magnétiques et gravimétriques entre 10 et 30 km d'altitude et ainsi aborder l'évolution court terme (< année) de la surface de la Terre à des échelles régionales et d'améliorer l'imagerie des structures lithosphériques. L'objectif de cette mission Cnes est également le déploiement d'instruments innovants associés à la gravimétrie quantique ou au magnétomètre MAM (Miniaturized Absolute scalar and self-calibrated vector Magnetometer) respectivement développés pour les missions **CARIOQA** et **NanoMagSat**. Ces mesures combleront une zone de lacune d'observations et seront clés pour mieux séparer les sources des signaux magnétiques et gravimétriques (enjeux TS.2, TS.3 et TS.4).

## 3.2. **AUTRES PRIORITÉS**

### 3.2.1. **INFRASTRUCTURES SOL**

Le groupe recommande le déploiement de l'Observatoire Géodésique Géophysique Fondamental de Tahiti, infrastructure unique dans le Pacifique Sud, combinant les quatre techniques géodésiques, indispensable pour améliorer la couverture du système de référence terrestre, d'autant que la station VLBI est actuellement garantie sur le principe par un financement de la Nasa. La réalisation d'une station SLR française de nouvelle génération est un enjeu majeur de ce projet. Cette infrastructure est complémentaire de la mission **GENESIS** (enjeu TS.1).

### 3.2.2. **RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT**

Développés tout au long de la dernière décennie, les gravimètres absolus quantiques au sol permettent d'envisager la possibilité de leur spatialisation. Positionnés au centre de masse d'un



satellite ils deviennent des accéléromètres ultra-précis et surtout absolus qui permettent de séparer les accélérations gravitationnelles et non-gravitationnelles que subit un satellite (mission du type **GRACE** ou **NGGM**). En couplant ces instruments par paire à bord d'un même satellite, ils permettent aussi de faire une mesure directe du gradient de gravité (mission du type **GOCE**). La communauté française est actuellement à la pointe du développement de ce type d'instrument. Le groupe réaffirme l'importance de soutenir le développement de ces capteurs innovants, notamment dans le cadre de la mission **CARIOQA**.

En magnétisme, la principale évolution à court terme consiste à reprendre la conception d'un magnétomètre d'observatoire terrestre autonome dont les mesures permettront de compléter les données satellitaires. Les premiers travaux sur ce sujet, menés dans le cadre de plusieurs actions R&T pour la mission **Swarm**, puis combinés aux progrès réalisés en préparation de **NanoMagSat** sur le MAM offrent d'intéressantes perspectives.

### 3.2.3. DONNÉES ET CALCULS

L'exploitation, la distribution et l'archivage des données doivent être un élément clé de la structuration de la communauté « Terre solide ». C'est un point critique sur les questions transverses (enjeu TS.4). Cela passe par un accès facilité aux données et des moyens de calculs adaptés aux traitements massifs, à l'inversion et à l'assimilation. L'utilisation pertinente des ressources en intelligence artificielle devra être au cœur de cette structuration. Le groupe soutient donc le renforcement et l'extension du Pôle ForM@Ter en relation avec l'infrastructure de recherche Data Terra.

## 4. CONCLUSION

Le groupe a souhaité mettre en avant des priorités favorisant le renforcement des expertises scientifiques et l'émergence d'idées nouvelles au sein de la communauté « Terre solide ». Les recommandations sont faites avec un souci d'efficacité, mais également de sobriété et de responsabilité vis-à-vis du dérèglement climatique. Ainsi, le groupe soutient un nombre limité de missions spatiales, adossées à des collaborations internationales et répondant à des besoins d'une large communauté allant au-delà des contours de la thématique « Terre solide ». Dans le tableau suivant les recommandations sont hiérarchisées par ordre de priorité décroissante.

Questions scientifiques	Observable	Cadre actuel de développement	Priorité	Remarques
TS.2, TS.3 et TS.4	Champ gravimétrique	MAGIC, mission Esa-Nasa. La phase-B2 doit être validée à l'automne 2024.	Majeure	Couvre les besoins d'une large communauté, permet une extension temporelle aux missions GRACE (-FO) avec une précision inégalée.
TS.1	Positionnement millimétrique	Observatoire Géodésique Géophysique Fondamental de Tahiti.	Majeure	Complémentaire de la mission <b>GENESIS</b> .
TS.1	Positionnement millimétrique	<b>GENESIS</b> , mission Esa FutureNAV approuvée en novembre 2022. Démarrage ABCD en 2024. Requiert	Majeure	Soutenue par la Nasa et le comité international GNSS des Nations Unies. Lancement prévu en 2028.

		le soutien au projet <b>DORIS-NEO.</b>		
TS.2, TS.3 et TS.4	Champ magnétique et gravimétrique	<b>GravMagBallon</b> , mission Cnes.	Majeure	Préparation mission <b>CARIOQA.</b>
Démonstrateur instrumentation spatiale.	–	<b>CARIOQA</b> , phase- A lancée en janvier 2024, Cnes, DLR, Commission Européenne, Airbus Défence and Space, GMV and FORTH/PRAXI.	Majeure	R&T Capteur quantique. Préparation des missions scientifiques opérationnelles post- <b>MAGIC</b> . Intérêt en physique fondamentale.
TS. 3 et TS.4	Suivi de la surface des terres émergées	<b>4D-Earth</b> , mission Cnes.	Substantielle	voir thématique « Surface continentale ».
TS.2, TS.3 et TS.4	Champ magnétique	<b>NanoMagsat</b> , mission Scout Esa.	–	Constellation de trois satellites. Les lancements débuteront en 2027.

## RÉFÉRENCES

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X., Métivier, L., & Chanard, K. (2023). ITRF2020: An augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. *Journal of Geodesy*, 97(5), 47, <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01738-w>.
- Lemrabet, L., Doin, M.-P., Lasserre, C., & Durand, P. (2023). Referencing of continental-scale InSAR-derived velocity fields: Case study of the eastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128, e2022JB026251. <https://doi.org/10.1029/2022JB026251>.
- Panet, I., Greff-Lefftz, M., & Romanowicz, B. (2022). Dense mantle flows periodically spaced below ocean basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 594, 117745, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117745>.