

GROUPE THEMATIQUE

TERRE SOLIDE

Pascal Allemand, Sylvain Bonvalot, Rodolphe Cattin (Président entrant), Patrick Charlot, Olivier de Viron (Président sortant), Michel Diament (représentant pôle ForM@Ter sortant), Bénédicte Fruneau, Marianne Greff, Cécile Lasserre (représentante pôle ForM@Ter entrante), Mioara Manda (responsable de thème sortante), Isabelle Panet, Erwan Pathier, Félix Perosanz (responsable de thème entrant), Lucie Rolland, Erwan Thébaud, Guy Wöppelmann.

Table des matières

1. Introduction	2
1.1. Objectifs scientifiques et enjeux sociétaux	2
1.2. Observations spatiales.....	2
1.3. Démarche et moyens.....	2
2. Bilan et avancées depuis la prospective du Havre 2019	3
2.1. Rappel des objectifs prioritaires	3
2.1.1. Missions spatiales.....	3
2.1.2. Infrastructures au sol	3
2.1.3. Instrumentation	4
2.1.4. Accès aux données et moyens de calculs.....	4
2.2. Résultats scientifiques majeurs depuis 2019	4
2.2.1. Nouvelle estimation du référentiel mondial.....	4
2.2.2. Dynamique de la Terre interne.....	5
2.2.3. Surface de la TERRE : une zone d'interactions entre Terre interne et forçages externes	8
2.2.4. Amélioration du suivi et de la compréhension des événements extrêmes.....	10
2.3. Implication de communauté française "Terre solide" au niveau international	13
2.4. Contribution au développement et à la distribution de codes	13
2.4.1. Logiciels	13
2.4.2. Produits de niveau 1	14
2.4.3. Produits de niveau 2	14
2.5. Retour sur la mise en oeuvre des priorités.....	15
2.5.1. Missions spatiales.....	15
2.5.2. Observatoire Géodésique Fondamental de Tahiti	15
2.5.3. Instrumentation	15
2.5.4. Accès aux données et moyens de calculs.....	16
2.6. Bilan fonctionnel du groupe thématique "Terre solide"	16
2.6.1. Appel à Propositions de Recherche	17
2.6.2. Contrats de thèses et post-doctoraux	18
3. Références	19

1. INTRODUCTION

1.1. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET ENJEUX SOCIÉTAUX

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 les surfaces continentales, les océans et l’atmosphère. Parallèlement à ces objectifs scientifiques, les changements globaux, et l’augmentation et la densification des populations requièrent que la communauté “Terre solide” réponde à plusieurs enjeux sociétaux, notamment sur les besoins énergétiques (hydrocarbures, géothermie), les ressources en minerais (construction, batterie, high-tech), les ressources en eau, et les risques naturels (glissement gravitaire, séisme, tsunami, volcan).

1.2. OBSERVATIONS SPATIALES

Dans ce contexte, les observations spatiales sont incontournables. Leur caractère global, homogène et de haute précision permet de compléter les mesures au sol en documentant des zones difficiles d’accès, voire inaccessibles. De plus, elles fournissent un suivi temporel continu et fréquent avec pour certaines observations des archives couvrant plusieurs décennies. On peut mentionner :

- les missions magnétiques et gravimétriques qui contribuent significativement à une caractérisation de la composition et de la forme de notre planète et ainsi à une meilleure compréhension de sa dynamique interne.
- les observations de géodésie spatiale qui permettent d’étudier les variations de rotation de la Terre et de fournir un référentiel mondial, qui est largement utilisé au-delà du contour de la thématique “Terre solide”.
- les mesures altimétriques qui fournissent des informations sur les reliefs terrestres et la surface des océans.
- les données d’imagerie spatiale qui permettent de mesurer les mouvements à la surface de notre planète dans le but de mieux appréhender les risques naturels, d’étudier à l’échelle lithosphérique les effets associés aux chargements atmosphériques, océaniques et hydrologiques et d’estimer le rebond isostatique lié à la fonte des glaciers.

1.3. DEMARCHE ET MOYENS

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 approche permet de compenser en partie 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 nécessite des développements numériques et des moyens de calcul conséquents. La communauté nationale “Terre solide”, soutenue par le CNES via notamment le pôle ForM@Ter de l’infrastructure de recherche Data Terra, les appels à projets et les financements de thèse et post-doc, est fortement impliquée dans ces développements. Plusieurs chaînes de traitement de données spatiales et de code de modélisation numérique développés par cette communauté sont des outils standards utilisés à l’échelle européenne et internationale.

2. BILAN ET AVANCEES DEPUIS LA PROSPECTIVE DU HAVRE 2019

2.1. RAPPEL DES OBJECTIFS PRIORITAIRES

Le groupe de travail "Terre solide" avait mis en avant quatre types de priorités sur (1) les missions spatiales, (2) les infrastructures au sol, (3) l'instrumentation et (4) l'accès aux données et aux moyens de calcul.

2.1.1. MISSIONS SPATIALES

Deux missions spatiales étaient fortement soutenues.

La mission **MARVEL** avait un double objectif : (1) Permettre le suivi du champ de gravité au moyen d'une double constellation en orbite polaire, l'une vers 470 km d'altitude, l'autre vers 7000 km; et par une mesure laser de distance, de qualité micrométrique, entre la constellation haute et la constellation basse. La constellation basse devait être équipée d'un SLR, d'un accéléromètre trois composantes et d'un récepteur GNSS. (2) Améliorer la stabilité du système de référence avec un positionnement ayant une précision millimétrique. Cet objectif devait être atteint en équipant un ou plusieurs satellites de la constellation haute des quatre techniques de positionnement géodésique : SLR, DORIS, VLBI, GNSS.

La seconde mission était **NanoMagSat** dont l'objectif premier était d'assurer un suivi continu du champ magnétique terrestre. Cette mission était un projet de 12 nanosatellites visant à compléter les observations de la mission **Swarm**. Ces satellites à orbite inclinée, mais circulaire, devaient permettre une couverture temporelle locale rapide et un meilleur suivi des variations temporelles globales rapides du champ géomagnétique. Cette mission était dédiée à 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.

Le groupe soutenait également le développement du projet **IonoGlow** dédié au suivi des tsunamis par imagerie de la signature airglow et à l'étude des interactions atmosphère/ionosphère.

2.1.2. INFRASTRUCTURES AU SOL

Les mesures espace-sol sont complémentaires. Depuis 1997, Tahiti est un site de référence géodésique fondamental. L'observatoire géodésique de Tahiti est régi par une convention entre la NASA, le CNES et l'Université de la Polynésie française concernant la gestion d'une station laser. Il est labellisé "site instrumenté" par le CNRS. Il a contribué à toutes les réalisations de l'ITRF (International Terrestrial Reference Frame) et fournit des données à cinq services internationaux relevant de l'Association Internationale de Géodésie (ILRS - International Laser Ranging Service, IGS - International GNSS Service, IDS - International DORIS Service, PSMSL - Permanent Service for Mean Sea Level, et IGETS - International Geodynamics and Earth Tides Service). Suite au constat de manque d'infrastructure VLBI dans le Pacifique sud, la communauté géodésique internationale, appuyée par la NASA et le CNES, a soutenu le projet d'un nouvel observatoire géodésique fondamental à Tahiti combinant les quatre techniques géodésiques fondamentales, cruciale 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 des instruments GNSS et DORIS, dans un cadre collaboratif international. Le groupe "Terre solide" considérait comme prioritaire la mise en place d'un tel observatoire.

2.1.3. INSTRUMENTATION

Au cours de la dernière décennie, le développement de gravimètres absolus quantiques, très précis et plus compacts, permet d'envisager la possibilité de mesurer le champ de gravité avec une meilleure précision à l'altitude des satellites. Ces instruments peuvent être couplés avec des accéléromètres ultra-précis également développés et testés. Cette technologie quantique a ouvert une nouvelle voie pour mesurer la gravité au sol avec une précision inégalée. La communauté française est actuellement leader sur ce type d'instrument. Le groupe de travail soulignait donc l'importance de maintenir l'excellence française dans le développement de ces capteurs innovants pour la gravimétrie spatiale (accéléromètres et gravimètres atomiques).

2.1.4. ACCES AUX DONNEES ET MOYENS DE CALCULS

Le groupe de travail soulignait la nécessité d'améliorer l'accès 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 souhaitait le développement du pôle ForM@Ter afin de permettre de recenser les besoins et de coordonner les efforts nécessaires.

2.2. RESULTATS SCIENTIFIQUES MAJEURS DEPUIS 2019

Durant le dernier quinquennal, les observations spatiales fournies à la communauté française et les développements méthodologiques associés ont permis d'améliorer le système de positionnement terrestre et d'aborder des questions scientifiques majeures sur le fonctionnement de notre planète, sa dynamique interne et le rôle des forçages externes. Le suivi et la compréhension de l'occurrence d'événements extrêmes comme les séismes et les tsunamis ont été améliorés.

2.2.1. NOUVELLE ESTIMATION DU REFERENTIEL MONDIAL

*Comment prendre en compte les variations non-linéaires saisonnières (semestrielles et annuelles)?
Quel est l'effet des déformations post-sismiques?*

Pour décrire et modéliser le fonctionnement de notre planète, il est indispensable de définir des systèmes de référence terrestre et céleste. Les campagnes de réanalyse des archives complètes des mesures de géodésie spatiale (DORIS, GNSS, VLBI et SLR) ont mobilisé des dizaines d'équipes dans le monde et ont abouti à des réalisations numériques, ITRF2020 (International Terrestrial Reference Frame, 2020 realization) et ICRF3 (International Celestial Reference Frame, 3rd realization), qui sont les plus performantes à ce jour en termes de couverture, densité, précision et stabilité. Les équipes françaises ont joué un rôle majeur dans ces réalisations, d'une part en traitant l'ensemble des données des quatre techniques, qui couvrent des périodes de 28 ans (DORIS), 27 ans (GNSS), 41 ans (VLBI) et 38 ans (SLR), d'autre part en pilotant les réalisations de ITRF2020 et de l'ICRF3 en elles-mêmes. De fait, les deux repères de référence fondamentaux, terrestre et céleste, en usage actuellement dans la communauté au niveau mondial, ont été produits sous l'égide d'équipes françaises.

La nouvelle version de l'ITRF apporte des améliorations significatives, en modélisant les mouvements non-linéaires des stations : mouvement saisonnier (annuel et semi-annuel) ainsi que les déformations post-sismiques des stations impactées par des tremblements de terre majeurs, comme illustré par la Fig. 1. La Fig. 2 illustre les champs de vitesses horizontales et verticales dont l'erreur formelle est inférieure à 1 mm/an. L'origine long-terme de l'ITRF2020 suit linéairement en fonction du temps le centre des masses déterminé par les données SLR. La précision de l'origine long-terme de l'ITRF2020 et son évolution temporelle est évaluée à 5 mm et 0.5 mm/an, respectivement.

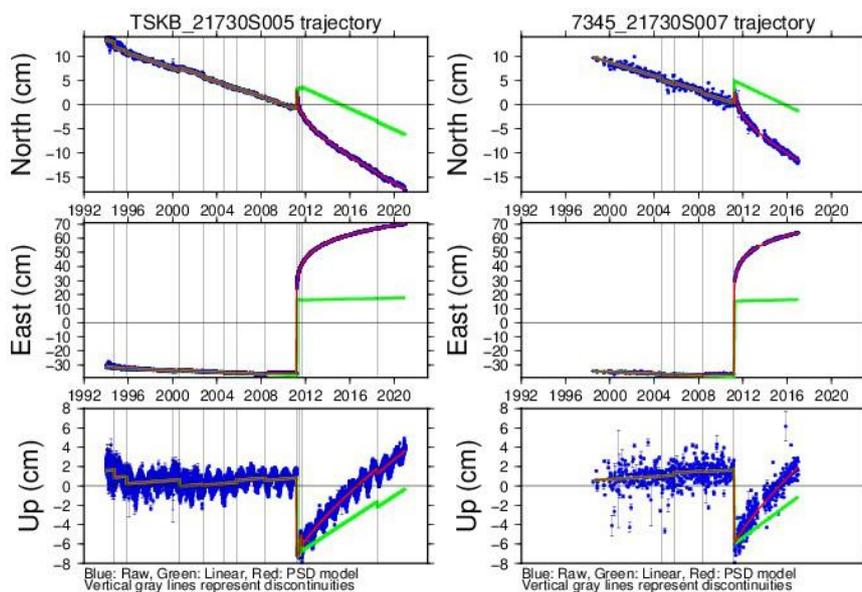
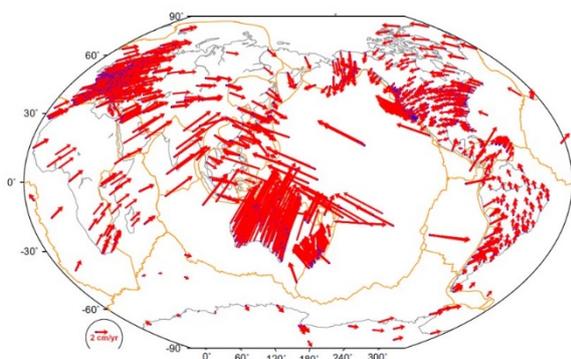


Fig. 1 : Trajectoire du site de Tsukuba (Japon). À gauche la station GNSS, à droite la station VLBI. En bleu les données brutes, en vert les trajectoires linéaires par morceaux à partir des coordonnées de l'ITRF2020 et en rouge les trajectoires obtenues en ajoutant le modèle paramétrique des déformation post-sismique (Altamimi et al., 2023).

Les applications de l'ITRF et de l'ICRF sont considérables et dépassent largement la thématique "Terre solide". En effet, si le référencement est un élément incontournable pour estimer précisément les déformations du sol associés à la tectonique ou au volcanisme, il est également indispensable pour définir le positionnement de tous les satellites d'observation de la Terre, caractériser les effets associés aux charges hydrologiques et atmosphériques, et étudier la fonte des glaces et les variations du niveau marin.

(a) Horizontal velocities



(b) Vertical velocities

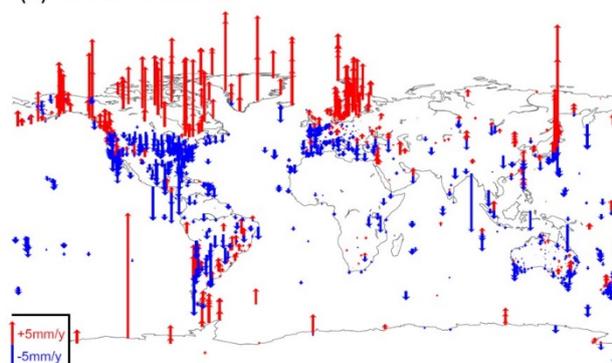


Fig. 2 : Vitesse horizontale (a) et verticale (b) des sites de l'ITRF2020 ayant une erreur formelle inférieure à 1 mm/an (Altamimi et al., 2023).

2.2.2. DYNAMIQUE DE LA TERRE INTERNE

Quelle est l'évolution thermique et compositionnelle de notre planète ? Quelle est la dynamique du noyau fluide à courte échelle de temps ? Quels sont ses couplages avec le manteau ? Quelle est la nature des hétérogénéités mantelliques et crustales ? Quel signal topographique long-terme génèrent-elles ?

Développements méthodologiques

Depuis 2019, une coordination nationale sans précédent des études concernant le champ magnétique terrestre a été rendue possible grâce à la mission européenne **Swarm**. La France, via l'Institut de Physique du Globe de Paris et le soutien du CNES, a tenu un rôle majeur dans la préparation et l'exploitation scientifique de cette mission. Les données sont délivrées librement à une communauté scientifique internationale très large, notamment celle de la météorologie spatiale qui poursuit des travaux exploratoires mais d'ores et déjà nombreux. Concernant la communauté "Terre solide", les équipes françaises ont mis en place des chaînes de traitement de données selon des standards industriels. Elles ont pu être développées et maintenues opérationnelles dans le cadre du consortium européen mis en place par l'ESA (Data Innovation Science Cluster, DISC) grâce au soutien du CNES. Parmi les innovations conceptuelles et méthodologiques, il convient de mentionner l'émergence d'algorithmes opérationnels d'assimilation de données géomagnétiques. Cette discipline au carrefour de la mesure brute, de la physique théorique, de la simulation géodynamo, de la modélisation des champs magnétiques internes requiert des mises en œuvre théoriques et numériques lourdes. Ces retombées scientifiques sont de premier ordre car elles ouvrent la voie à des descriptions spatio-temporelles du champ magnétique fines et robustes et stimulent la recherche en modélisation numérique de la dynamo terrestre pour laquelle les équipes françaises ont acquis une notoriété mondiale.

Dans le même temps, des développements méthodologiques ont été mis en œuvre pour extraire le signal d'intérêt dans les données de gravimétrie et gradiométrie spatiales, qui sont par nature intégratives et bruitées. Cette étape est cruciale pour l'étude de la Terre solide, car les signaux sont de petite amplitude par rapport à ceux issus du système climatique. La démarche utilisée est basée sur le développement de méthodes d'analyse des modèles de champ de gravité issus des missions **GRACE(-FO)** et **GOCE**, sur l'estimation précise des corrections appliquées (retrait de sources modélisées connues), et la combinaison de ces données avec d'autres observables géodésiques (InSAR, altimétrie, GNSS) et géophysiques (sismologie, magnétisme et gravimétrie au sol). Plusieurs algorithmes ont été développés par la communauté française avec le soutien du CNES. Ils permettent la modélisation gravimétrique directe des données spatiales à partir d'une distribution de masse hétérogène et de géométrie quelconque, et des inversions conjointes combinant gravimétrie et gradiométrie spatiale, gravimétrie au sol et sismologie.

Résultats obtenus

Complémentaires des mesures sismologiques, les observations spatiales magnétiques et gravimétriques permettent de mieux imager l'intérieur de la Terre et ainsi mieux contraindre sa dynamique.

Dans le cadre de l'ERC Synergy GRACEFUL (PI - M. Manda) qui regroupe une partie de la communauté "Terre solide", de nombreux résultats sur le noyau terrestre ont été obtenus. L'analyse conjointe des observations 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. Une période similaire a également été détectée pour plusieurs paramètres climatiques (niveau de la mer, température de surface, précipitations, hydrologie terrestre, glace terrestre et moment cinétique atmosphérique). Cette corrélation peut suggérer un lien entre Terre interne et climat (voir paragraphe 1.2.2.). Des études visant à déterminer les processus impliqués dans ce couplage sont actuellement menées. La sismologie suggère que le noyau interne tourne avec le reste de la Terre, mais avec de légères fluctuations par rapport au manteau. L'analyse des variations gravitationnelles enregistrées par **GRACE(-FO)** apporte de nouvelles contraintes sur la dynamique du manteau en suggérant que l'angle de réorientation de la graine n'est pas supérieur à $0,4^\circ$ entre 4 et 12 ans.

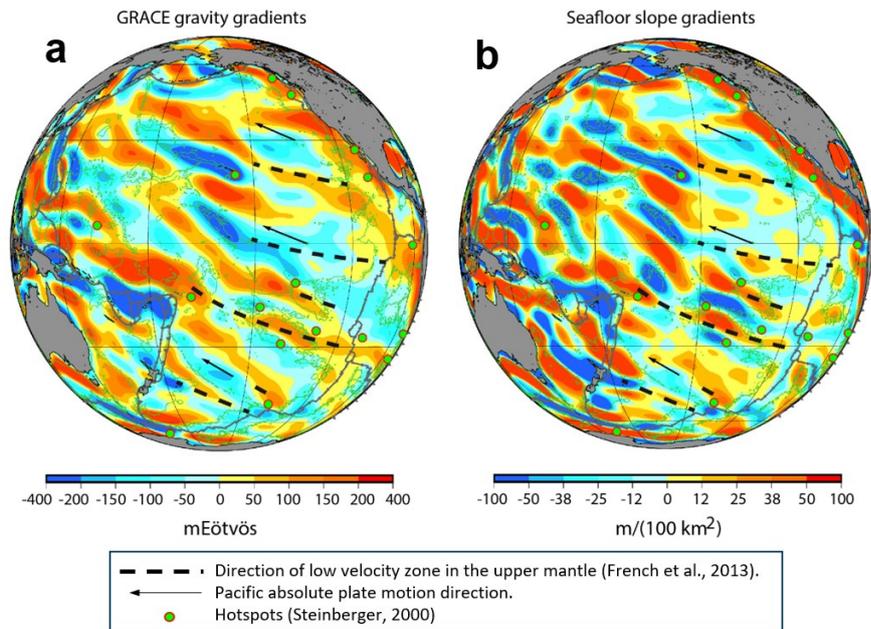


Fig. 3 : Ondulations alignées avec la direction absolue du mouvement de la plaque Pacifique dans (a) les gradients de gravité longitudinaux filtrés à 1100 km et (b) les dérivées secondes de la topographie des fonds océaniques (Panet et al., 2022).

Les observations spatiales **GOCE** et **GRACE** ont également permis d'améliorer notre connaissance de la dynamique mantellique en mettant en évidence des ondulations périodiques de longueur d'onde d'environ 2000 km dans le champ de gravité et la topographie des fonds océaniques (Fig. 3). Ces ondulations alignées avec le mouvement actuel des plaques, dans l'océan Pacifique et l'océan Indien, coïncident avec des zones sismiques lentes dans le manteau supérieur. Ces observations suggèrent la présence d'une convection secondaire thermo-chimique dans le manteau supérieur sous les bassins océaniques et l'existence d'une zone de transition étendue.

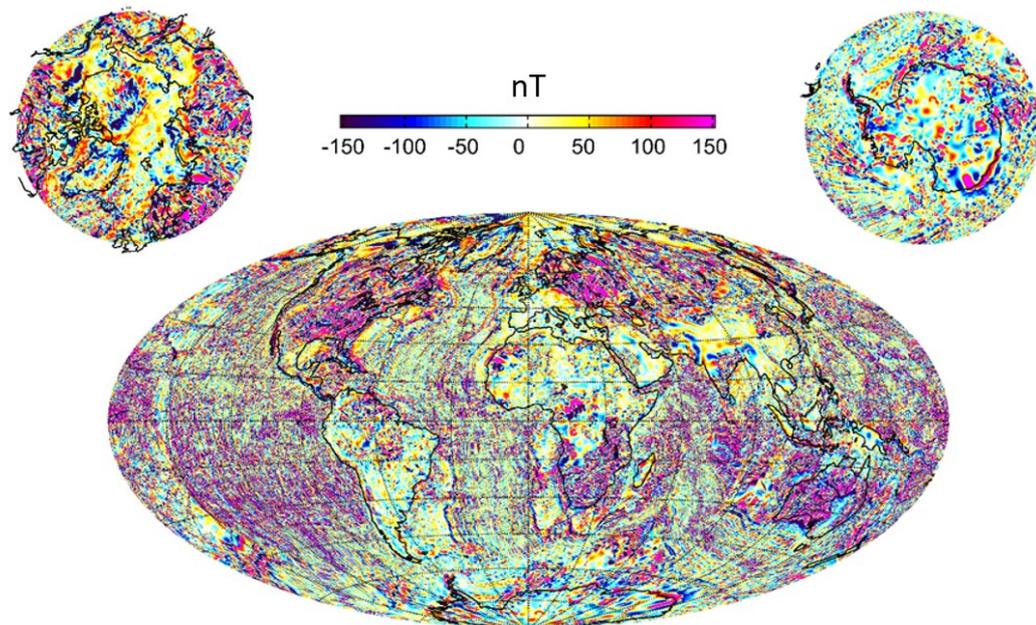


Fig. 4 : Composante radiale du champ magnétique crustal modélisé à 30 km de résolution spatiale par la chaîne xDLFI à partir des données Swarm, CHAMP et des levés aéromagnétiques et marins (Thébault et al., 2021; Dyment et al., 2023).

À l'échelle lithosphérique, la mise à disposition d'un modèle du champ magnétique global à haute résolution (Fig. 4) calculé à partir de la compilation des données aériennes et marines dans le cadre du projet World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM, soutenu par le CNES) et les données satellitaires **Swarm** est une avancée significative pour l'étude de nombreux contextes géodynamiques comme les dorsales, les subductions et les collisions. La mise en place d'inversion conjointe de données gravimétriques sol et gradiométriques **GOCE**, ont permis la caractérisation de variations latérales de structure et de géométrie des plaques en zone de collision. Ceci a permis de localiser des barrières possibles à la propagation d'une rupture sismique, et donc mieux caractériser l'aléa sismique (voir paragraphe 2.2.3).

2.2.3. SURFACE DE LA TERRE : UNE ZONE D'INTERACTIONS ENTRE TERRE INTERNE ET FORÇAGES EXTERNES

Comment la Terre interne se déforme sous les charges fluides et que peut-on en apprendre sur sa rhéologie ? Comment les failles actives répondent-elles aux perturbations de contraintes associées au processus de surface ? Peut-on quantifier les flux d'érosion depuis les zones de montagnes jusqu'aux deltas des fleuves ? Quelle est la décharge sédimentaire associée dans les océans ?

Développements méthodologiques

Depuis 2019, le service COPERNICUS DEM met à la disposition de la communauté scientifique des modèles numériques de surface globaux ayant une résolution de 30 m (10 m pour l'Europe). De plus, des chaînes de traitement des données **SENTINEL-2** et **Pléiades** développées par la communauté française via le logiciel MicMac permettent d'obtenir la topographie avec une résolution inégalée inférieure au mètre.

Dans le même temps, les missions gravimétriques **GRACE(-FO)** ont fourni suffisamment de données de haute qualité pour être exploitées massivement hors de la communauté gravimétrie - géodésie, notamment pour l'étude des forçages climatiques associés à l'hydrologie, la cryosphère et les océans. Cette exploitation repose sur l'analyse des modèles de champ de gravité globaux construits à partir des observations brutes, dont l'accroissement de qualité permet l'identification d'un nombre croissant de signaux. L'expertise française dans la construction de ces modèles est un atout essentiel pour le développement de ces applications.

Résultats obtenus

La possibilité de disposer de données topographiques de haute, voire très haute résolution via la mission **Pléiades**, a permis des avancées significatives en géomorphologie quantitative, notamment (1) pour caractériser les volumes associés à des coulées volcaniques ou à des glissements gravitaires, (2) pour étudier les déséquilibres topographiques associés à la dynamique des paysages et l'activité tectonique, ou (3) pour mieux définir les processus impliqués dans la formation des terrasses alluviales.

Les données gravimétriques **GRACE** ont pour la première fois été utilisées avec succès pour détecter la charge sédimentaire à l'embouchure de grands fleuves comme l'Amazone, le Ganges-Brahmapoutre ou le Yangtze (Fig. 5), ouvrant la possibilité de mieux comprendre comment les changements naturels ou anthropiques peuvent affecter la dynamique des paysages.

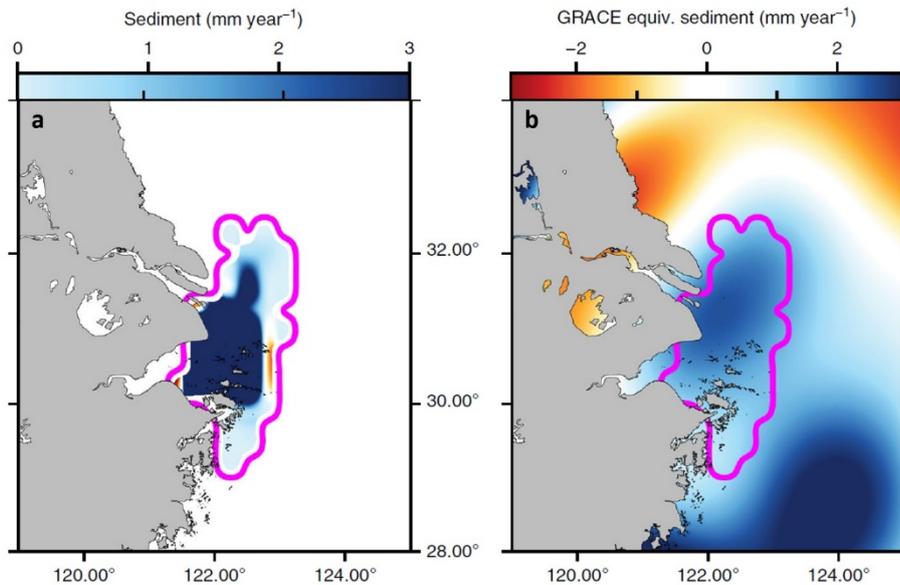


Fig. 5 : Carte de la sédimentation (a) et signal gravimétrique GRACE (b) à l'embouchure du Yangtze. La ligne rose donne la limite de sédimentation (Mouyen et al., 2018, 2020).

La comparaison du champ de vitesse global de l'ITRF (voir paragraphe 2.2.4) avec les variations d'ellipticité du géoïde a montré l'impact prépondérant de la fonte des glaces actuelle sur les déformations globales de la Terre sur les 20 dernières années. Ce résultat montre également que les modèles classiques de rebond post-glaciaire sous-estiment très probablement les variations long-terme d'ellipticité du géoïde terrestre.

Une analyse détaillée du bruit dans les mesures GNSS a démontré l'influence du chargement apériodique atmosphérique et océanique principalement sur la composante verticale des séries temporelles. Ce type d'approche, très prometteur, permet d'envisager un suivi détaillé et haute fréquence du changement global.

Au cours de la dernière décennie, plusieurs études ont montré la pertinence des satellites **GRACE(-FO)** pour estimer les variations spatio-temporelles des masses d'eau à la surface de la Terre. Les études les plus récentes montrent qu'une approche combinant ces données et les techniques de géodésie spatiale (GNSS, InSAR et altimétrie) permet de caractériser l'évolution des ressources en eau souterraine, apportant ainsi de nouvelles contraintes sur les propriétés mécaniques des aquifères et plus largement sur le comportement élastique, poro-élastique et inélastique de la croûte terrestre (Fig. 6).

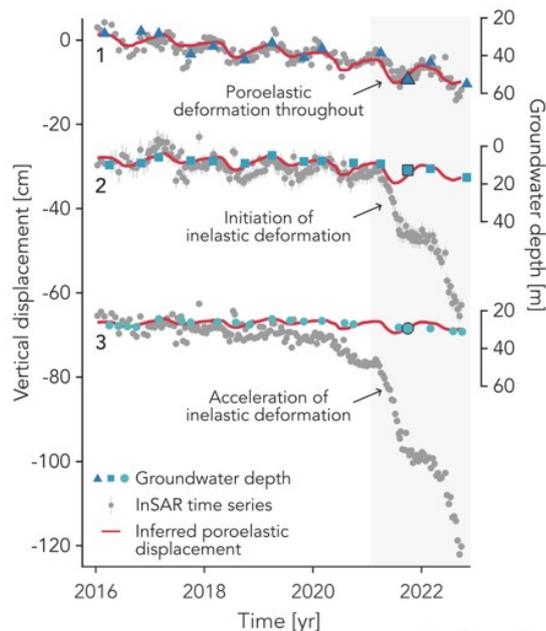


Fig. 6 : Série temporelle du niveau de la nappe phréatique (points bleu) et des déplacements InSAR (point gris) mesurés entre 2016 et 2023 dans la vallée Californienne de Sacramento. Les lignes rouges montrent les déplacements poro-élastiques modélisés. La zone grisée indique la période de subsidence inélastique accélérée en 2021-2022. (Larochelle et al., 2023).

2.2.4. AMELIORATION DU SUIVI ET DE LA COMPREHENSION DES EVENEMENTS EXTREMES

Quels sont les processus menant à la rupture sismique ? Quelle est l'influence des déformations post-sismiques sur la redistribution des contraintes et l'évaluation de l'aléa sismique ? Quelles sont les interactions entre glissement lents et séismes ? Comment améliorer le suivi temporel haute fréquence des éruptions volcaniques ? Quels sont les mécanismes permettant le suivi des tsunamis depuis l'espace ?

Développements méthodologiques

L'étude du cycle sismique et des déformations associées a bénéficié de la mise au point et de la mise à disposition d'outils de traitement et de visualisation de données traitées. Ces outils simplifient l'utilisation des données satellitaires, ainsi que l'analyse des résultats. On peut citer la chaîne de traitement MicMac pour le calcul de champ de déformation à partir d'images optiques, ou le développement par ForM@Ter du service GDM-SAR pour l'INSAR. Couplés, au développement de modèles numériques et de méthodes d'inversion, ces nouveaux outils ont permis de quantifier très rapidement, en période de crise, les distributions de glissement cosismique associées aux séismes du Teil 2019, d'Haïti 2021, de Grèce 2021, et plus récemment aux évènements ayant affecté en 2023 la Turquie-Syrie (Fig. 7) et le Maroc. Enfin, on peut mentionner la mise en place en 2020 du service FLATSIM du pôle ForM@Ter, fortement soutenu par le CNES. Ce service, après évaluation des propositions de la communauté en réponse à un appel d'offres, permet de produire de manière systématique des interférogrammes à partir des données **Sentinel-1**, ainsi que des séries temporelles de déplacement, sur de larges zones géographiques pouvant dépasser le million de km². L'analyse de telles surfaces pour en extraire des vitesses de déplacement de l'ordre de quelques millimètres par an a nécessité de nouveaux développements méthodologiques en InSAR avec la prise en compte des effets de marées solide et du mouvement rigide de plaque, ceci afin de référencer les mesures INSAR dans un référentiel ITRF avec un apport minimal des observations GNSS. Des outils de visualisation adaptés à la masse de données produite par des services comme FLATSIM, deviennent aussi nécessaires, et font l'objet de développement comme celui de l'outil InSarViz pour la visualisation de séries temporelles INSAR.

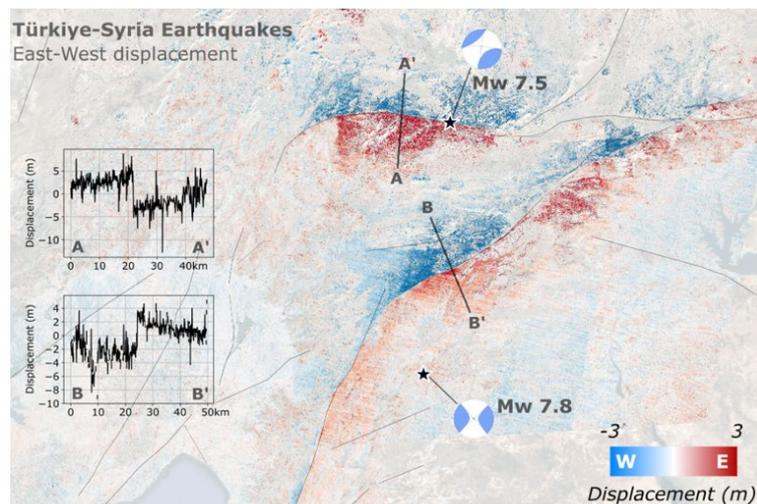


Fig. 7 : Séismes Turco-Syrien février 2023. Déplacements cosmiques horizontaux (composante Est-Ouest) obtenus à partir des données Sentinel-2. Le code de couleur donne le sens de déplacement. Les deux profils AA' et BB' au travers des failles ayant rompu montrent des décalages pouvant localement atteindre la dizaine de mètres (Provost et al., 2023).

L'ionosphère est la couche la plus externe de l'atmosphère terrestre, générée sous l'effet des rayons ionisants du soleil et s'étend au-delà de 80 km au-dessus de la surface terrestre. Cette couche ionisée est en forte interaction avec le champ magnétique terrestre et sa dynamique globale est une composante importante de la météorologie de l'espace. La dernière décade a été marquée par la densification des mesures de délais ionosphériques qui affectent les signaux radio « multi-GNSS » émis par les satellites GPS, GLONASS et plus particulièrement Galileo. Les capacités d'imagerie airglow embarquées se sont aussi développées via les missions GOLD et ICON de la NASA. Ces mesures permettent d'explorer finement les perturbations de la haute atmosphère et de mieux comprendre les mécanismes de leur génération sous l'angle des couplages dynamiques entre la Terre solide, l'océan, l'atmosphère et l'ionosphère.

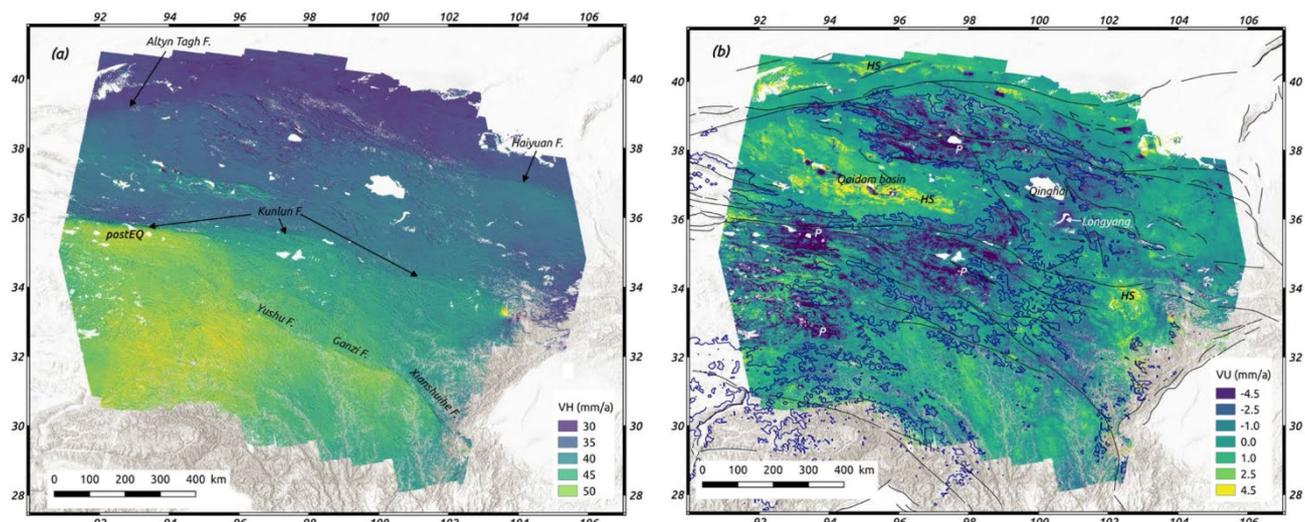


Fig. 8 : Champs de vitesse de déplacement horizontal (à gauche) et vertical (à droite) sur l'ensemble de l'Est Tibet obtenu par l'analyse massive de séries temporelles InSAR Sentinel-1 générées par le service FLATSIM de ForM@Ter (Lemrabet et al. 2023).

Résultats obtenus

Des avancées significatives ont été faites pour mieux estimer la déformation des plaques continentales en contexte de subduction. L'utilisation conjointe de mesures InSAR, GNSS a permis d'améliorer la compréhension des séismes lents et la répartition des hétérogénéités frictionnelles le

long de la subduction mexicaine. Ces approches ont également permis l'évaluation du partitionnement de la déformation Andine avec le challenge technique du fort relief et de l'utilisation de données **ALOS** en bande L.

En domaine continental, mentionnons les premières mesures InSAR des déplacements inter-sismiques à l'échelle de l'arc Alpin, qui comme les données GNSS, suggèrent une vitesse surrection pouvant atteindre localement plusieurs mm/an. L'utilisation combinée des données InSAR et GNSS a permis le suivi du cycle sismique le long des failles nord- et est-anatoliennes. Sur l'Est du Tibet, l'analyse des données INSAR **Sentinel-1** et GNSS a permis d'obtenir une cartographie continue des vitesses de déplacement horizontal et vertical avec une résolution spatiale de la centaine de mètres (Fig. 8). Le champ horizontal montre clairement comment les déformations tectoniques de l'Est-Tibet sont dominées par le signal intersismique et post-sismique de grandes failles décrochantes. Le champ vertical est lui assez affecté par des processus de surfaces avec des contributions hydrologiques (e.g. dégradation du pergélisol, fluctuations hydrologiques interannuelles dans des bassins sédimentaires). Ces processus sont responsables d'une plus grande hétérogénéité spatiale et temporelle. Des résultats similaires ont également été obtenus sur les Alpes ou les Apennins.

Présenté comme un résultat majeur de la prospective 2019 du Havre, des études menées au cours de ce quinquennal ont confirmé la possibilité de détecter des signaux gravimétriques pré-sismiques court-terme (environ 2 mois) d'origine profonde avant deux ruptures géantes (Maule 2010, Tohoku 2011). 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 ces ruptures géantes. La détection et le caractère singulier du signal pré-Tohoku ont pu être réalisés sans connaissance de la rupture consécutive. L'utilisation des données gravimétriques a également permis de développer des inversions conjointes **GRACE** et GNSS pour localiser la rupture des séismes du bassin de Wharton (2012) et ainsi apporter des contraintes sur la viscosité asthénosphérique.

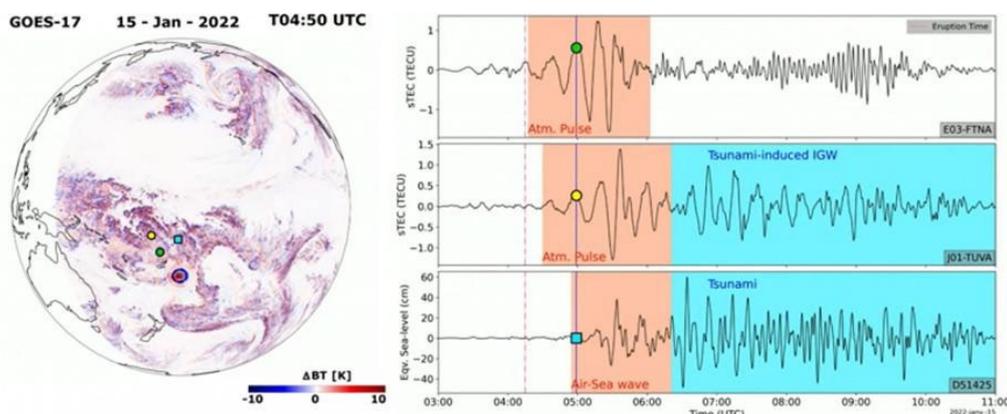


Fig. 9 : À gauche : observation des variations de température de la basse atmosphère par un satellite géostationnaire une heure après l'éruption principale du Hunga Tonga. À droite : perturbations détectées simultanément dans l'ionosphère avec GNSS (signature de l'onde de Lamb et du tsunami), et au niveau de l'océan avec un capteur de pression. Les différentes mesures sont localisées par un disque vert, jaune et un carré bleu (Matoza et al., 2022).

L'éruption volcanique de Hunga Tonga le 15 janvier 2022 et les séismes de Sulawesi en 2018 et de Turquie en 2023, très bien observés via le contenu électronique total (TEC) extrait à partir des données GNSS, ont ainsi marqué la période récente en permettant de décrire la chronologie des émissions d'énergie volcanique ou sismique brutalement injectée dans l'atmosphère (Fig. 9). La modélisation physique des ondes de gravité générées par les tsunamis a été initiée. Elle doit permettre à terme le développement de systèmes d'alerte basés sur les données ionosphériques.

2.3. IMPLICATION DE COMMUNAUTE FRANÇAISE “TERRE SOLIDE” AU NIVEAU INTERNATIONAL

La communauté française “Terre solide” reste très active à l’échelle internationale en géodésie, gravimétrie et magnétisme :

- La coordination ou la contribution aux services scientifiques internationaux de l’Association Internationale de Géodésie (AIG/IAG). La communauté internationale est très structurée, avec des associations actives et puissantes. La France est ainsi centre de produit pour l’International Terrestrial Reference System (ITRS) et pour l’International Celestial Reference System (ICRS). Plusieurs équipes françaises 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).
- La France héberge aussi le Bureau Gravimétrique International (BGI) et l’International Geodynamics and Earth Tides Service (IGETS).
- En géomagnétisme, la communauté française est très engagée auprès de l’Association Internationale de Géomagnétisme et d’Aéronomie (IAGA/AIGA). La communauté française a piloté le groupe international pour la dernière construction du champ géomagnétique international de référence (IGRF). Le Service International des Indices Géomagnétiques (ISGI) est également hébergé par la France et bénéficie d’une réputation internationale de premier plan. ISGI collabore avec de nombreux acteurs du monde académique et civil. Enfin, le projet de cartographie mondiale des anomalies magnétiques (World Digital Magnetic Anomaly Map) est toujours piloté par la France dans un consortium international. Le projet WDMAM vise à compiler toutes les mesures aéromagnétiques, marines et satellitaires dans une carte magnétique globale décrivant les structures magnétiques de la lithosphère terrestre. Au cours du dernier quadriennal, de nouvelles mesures ont été traitées et compilées pour générer une version 2.1 de WDMAM disponible en science ouverte. Le Bureau Central de Magnétisme Terrestre (BCMT) quant à lui gère l’observatoire national magnétique de Chambon-La-Forêt et un réseau de 18 observatoires hors métropole ainsi qu’un réseau de 11 stations de répétition en France métropolitaine. La mission du BCMT est de fournir des observations géomagnétiques et produits de données de haute précision afin de répondre aux spécifications du Réseau International d’Observatoires Magnétiques en Temps Réel (INTERMAGNET) dont il est un organe majeur. Les données de ces services bénéficient de labels de reconnaissance aux niveaux national et européen et est intégré au sein de l’infrastructure européenne EPOS, des infrastructures françaises DataTerra, du pôle ForM@Ter, de l’Organisation de Recherche Appliquée en Météorologie (The Organization for Applied Research in Meteorology), etc.

2.4. CONTRIBUTION AU DEVELOPPEMENT ET A LA DISTRIBUTION DE CODES

La communauté “Terre solide” contribue fortement au développement et à la distribution de codes permettant de traiter, visualiser et interpréter les données des missions spatiales, notamment en magnétisme, en gravimétrie et pour l’étude de la déformation à la surface de la Terre. Certains de ces codes sont devenus des outils standard utilisés par une large communauté internationale.

2.4.1. LOGICIELS

- Dynamical magnetic field line imaging (DMFI), Visualisations géodynamos, J. Aubert IPGP (<https://www.ipgp.fr/~aubert/tools.html#data>)
- pygeodyn: package python d’assimilation de données géomagnétiques, produisant des modèles d’écoulements à la surface du noyau terrestre et estimant la contribution de ces derniers aux variations de la durée du jour, N. Gillet ISTERRE (<https://geodynamo.gricad-pages.univ-grenoble-alpes.fr/pygeodyn/>)
- Webgeodyn : Package Python de visualisation Web pour le champ magnétique et les écoulements du noyau terrestre, N. Gillet ISTERRE (<https://geodyn.univ-grenoble->

- alpes.fr/)SHTns : Spherical Harmonic Transform for Numerical Simulation, N. Schaeffer ISTERre (<https://nschaeff.bitbucket.io/shtns/>)
- XSHELLS : High performance simulation of the geodynamo, N. Schaeffer, ISTERre <https://nschaeff.bitbucket.io/xshells/>, licence CeCiLL
- MagIC, Thomas Gastine (gastine@ipgp.fr), <https://magic-sph.github.io/>, licence GNU GPL v3
- Traitement des données magnétiques par drones et modélisation du champ crustal en harmoniques rectangulaires, E. Thébaud, LMV/OPGC, <https://doi.org/10.25519/1QG6-QH39>.
- Multiscale gravity gradient analysis, I. Panet, IPGP, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20255679>.
- Temporal gravity gradient analysis, I. Panet, IPGP, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20255487>.
- Identification of clusters and overlaps to test the consistency of signals between different gravity models, C. Narteau, IPGP, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20267925>.
- Python tools for working with spherical harmonic coefficients from the GRACE and GRACE Follow-On missions, H. Lecomte, EOST, <https://github.com/hulecom/read-GRACE-harmonics>.
- Matlab-based program to calculate gravity and gravity gradients due to irregularly shaped bodies, A. Saraswati, Géosciences Montpellier, <https://github.com/anitasaraswati/GEEC>.

2.4.2. PRODUITS DE NIVEAU 1

- ASMV, Mesures magnétiques expérimentales des magnétomètres ASM (conçus par le CEA-Léti, fourni par le CNES, et sous la responsabilité scientifique de l'IPGP) embarqués à bord des satellites de la mission Swarm de l'ESA., <https://swarm.ipgp.fr/#nav-asmv-data>, G. Hulot, IPGP
- BCMT, Bureau Central de Magnétisme Terrestre, mesures continues aux observatoires et stations magnétiques avec notamment les données de Kourou dont la mesure est soutenue par le CNES, www.bcmt.fr, V. Lesur, IPGP.

2.4.3. PRODUITS DE NIVEAU 2

- Modèle géomagnétique international de référence (IGRF), <https://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html>, consortium international.
- An operational prediction for the geomagnetic field evolution 2015-2115, modèles de champ géomagnétique, <https://www.ipgp.fr/~aubert/tools.html#data>, J. Aubert, IPGP.
- State-of-the-art numerical simulations of the geodynamo, series temporelles décrivant le champ géodynamo pour des conditions numériques "Earth-like", <https://www.ipgp.fr/~aubert/4dearth.html>, J. Aubert, IPGP.
- Service International des Indices Géomagnétiques, https://isgi.unistra.fr/ws_documentation.php, A. Chambodut, ITES.
- Modèles de champs magnétiques ionosphériques, <https://swarm-diss.eo.esa.int/#swarm/Level2longterm/MIO/>, A. Chulliat, Université Colorado/IPGP.
- WDMAM : Carte mondiale des anomalies magnétiques : www.wdmam.org, J. Dymant et coll., IPGP.
- COV-OBSx2, modèles de champ géomagnétique principal, <https://www.spacecenter.dk/files/magnetic-models/COV-OBSx2/>, N. Gillet, ISTERRE
- Modèles de champ magnétique lithosphérique à haute résolution, <https://swarm-diss.eo.esa.int/#swarm/Level2longterm/MLI/>, E. Thébaud, LMV/OPGC/IPGP
- Modèles climatologiques du champ magnétique ionosphérique Sq, <https://swarm-diss.eo.esa.int/#swarm/Level2longterm/MIO/>, A. Chulliat, G. Hulot, Université Colorado/IPGP.
- Modèles du champ du noyau et des mouvements associés à la surface du noyau, <https://swarm-diss.eo.esa.int/#swarm%2FLevel2longterm%2FCFW>, V. Lesur, IPGP

- Swarm climatological models of low- and mid-latitude F-region ionospheric currents, <https://doi.org/10.18715/IPGP.2023.lddf04so>, M. Fillion, G. Hulot, P. Alken, A. Chulliat, IPGP/Université Colorado

2.5. RETOUR SUR LA MISE EN OEUVRE DES PRIORITES

Le bilan des priorités mises en avant en 2019 par le groupe de travail “Terre solide” est en demi-teinte. En effet, bien qu’une partie des missions soutenues n’ait pas abouti, de nouveaux projets ont vu le jour au cours des cinq dernières années. Le projet concernant l’observatoire géodésique fondamental à Tahiti n’est pas encore concrétisé, mais reste fortement soutenu par la communauté française et internationale. Les recommandations faites sur l’instrumentation et sur l’accès aux données et aux moyens de calcul, ont été largement suivies avec une forte montée en puissance du pôle ForM@Ter.

2.5.1. MISSIONS SPATIALES

Pour la mission **MARVEL**, une phase-0 a été réalisée mais la proposition a finalement été abandonnée (dans un contexte compétitif) au bénéfice d’une plus grande implication des chercheurs français dans la mission gravimétrique **MAGIC** (Mass Change and Geophysics International Constellation) de l’ESA. Parallèlement, la mission de positionnement **GENESIS** de l’ESA a été validée lors de la CMIN2022 (Conférence MINistérielle) avec une participation française. Ainsi ces futures missions **MAGIC** et **GENESIS** devraient permettre d’atteindre le double objectif (gravimétrique et système de référence) initialement proposé dans la mission **MARVEL**.

Le projet **NanoMagSat** est piloté scientifiquement par une équipe française sous la direction de G. Hulot. Il est soutenu par un consortium scientifique rassemblant 16 pays membres de l’ESA. Ce projet est désormais consolidé et les aspects techniques ont été très favorablement évalués.

Le non aboutissement de la mission **IonoGlow** est principalement lié au décès de son porteur Giovanni Occhipinti en décembre 2021. La communauté poursuit son objectif principal d’améliorer la prévision des tsunamis depuis l’espace, en axant les développements sur les sondages ionosphériques GNSS.

2.5.2. OBSERVATOIRE GEODESIQUE FONDAMENTAL DE TAHITI

Au printemps 2021, ce projet a été relancé sous l’impulsion du Bureau des Longitudes. Un comité de pilotage composé des principaux organismes concernés a été constitué et s’est réuni toutes les 6 semaines environ. En 2022, l’INSU a chargé Faycal Rejiba de ce projet, qu’elle porte avec le soutien du CNES et de l’Université de la Polynésie française. La NASA a confirmé son souhait d’installer sur le site du nouvel observatoire une antenne VLBI. L’attribution d’une parcelle du domaine est en discussion avec le territoire. Le financement du projet reste à consolider.

2.5.3. INSTRUMENTATION

La communauté française est actuellement leader sur les technologies de la gravimétrie/gradiométrie quantique. Exail est en effet la seule société qui commercialise aujourd’hui les gravimètres à atomes froids. Cette société a bénéficié depuis plus de 15 ans d’un fort soutien académique pour les développements (LP2N and LNE-SYRTE) et les tests comparatifs (INSU). Des études sont menées avec le SHOM-ONERA pour un instrument commercial embarqué et avec le LNE et l’observatoire de Paris pour le développement de gradiomètres quantiques.

Les cinq dernières années ont permis des études de performance des interféromètres pour les missions de gravimétrie spatiale et l’évaluation de capteurs gravimétriques innovants basés sur l’utilisation d’atomes froids : gravimètre atomique de Exail (premier gravimètre atomique absolu portable), et gravimètre Girafe de l’ONERA embarqué sur plate-forme mobile (couplant des accéléromètres à un gravimètre atomique). Ces avancées technologiques sont au cœur du projet européen **CARIOQA** coordonné par le CNES.

Le nouveau concept de surveillance du champ géomagnétique, **NanoMagSat**, repose sur trois nanosatellites identiques de 16 Unités (16U) dont la charge utile comprend des magnétomètres miniaturisés. Ces magnétomètres sont associés à deux caméras stellaires pour l'orientation du vecteur champ magnétique. Deux nouveaux prototypes d'instruments ont été conçus. Le « MAM » (Miniaturized Absolute Magnetometer) est une version miniaturisée du magnétomètre absolu de **Swarm** développé par le CEA-Léti qui avait déjà fait l'objet du soutien du CNES lors de la phase préparatoire de la mission européenne Swarm. Le MAM fonctionne simultanément en mode vectoriel à 1 Hz, et en mode scalaire « Burst » à 2kHz. Le second instrument est un magnétomètre vectoriel relatif à haute fréquence. Ce « HFM » (High Frequency Magnetometer) fournira des données magnétiques vectorielles à 2kHz complétant les données scalaires acquises à 2kHz par le MAM. Ces deux nouvelles technologies ont été développées par le CEA-Léti et ont bénéficié d'actions R&T soutenues par le CNES. Pour chaque magnétomètre, la phase d'Electrical Ground Support Equipment (EGSE) a été finalisée et des modèles d'engineering (EM) sont en voie d'être achevés.

2.5.4. ACCES AUX DONNEES ET MOYENS DE CALCULS

Au cours des cinq dernières années, ForM@Ter est devenu un acteur incontournable de la communauté Terre solide travaillant notamment sur les données spatiales. Fortement soutenu par le CNES et le CNRS, ce pôle met à disposition un catalogue de données couvrant notamment la géodésie, le géomagnétisme, la tectonique, la volcanologie, et la géomorphologie. Il offre également des services de visualisation des données GNSS et de calcul à la demande des déformations du sol par interférométrie radar et corrélation d'images optique. Enfin, 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 DataTerra et les services nationaux d'observation.

2.6. BILAN FONCTIONNEL DU GROUPE THEMATIQUE “TERRE SOLIDE”

Le groupe thématique comprend 14 membres (5 femmes et 9 hommes) dont les expertises couvrent les activités spatiales menées par la communauté française. Les principaux laboratoires sont représentés en cohérence avec le nombre de chercheurs impliqués à l'échelle nationale (Fig. 10). Le groupe se réunit une fois par an pour l'évaluation des projets APR (Appel à Propositions de Recherche). Ces membres échangent régulièrement par messagerie électronique ou en visioconférence pour préparer les comités TOSCA et discuter des dossiers pour les contrats de thèses et post-doctoraux. La mise à disposition d'un site web dédié permettrait de faciliter la communication entre les membres du groupe et vers l'ensemble de la communauté “Terre solide”. Dans la période 2019-2023, exceptée l'arrivée de Félix Perosanz en 2022 comme nouveau responsable de thème en remplacement de Mioara Manda, et la nomination de Rodolphe Cattin en 2023, comme président en remplacement de Olivier de Viron, les membres du groupe n'ont pas été renouvelés.

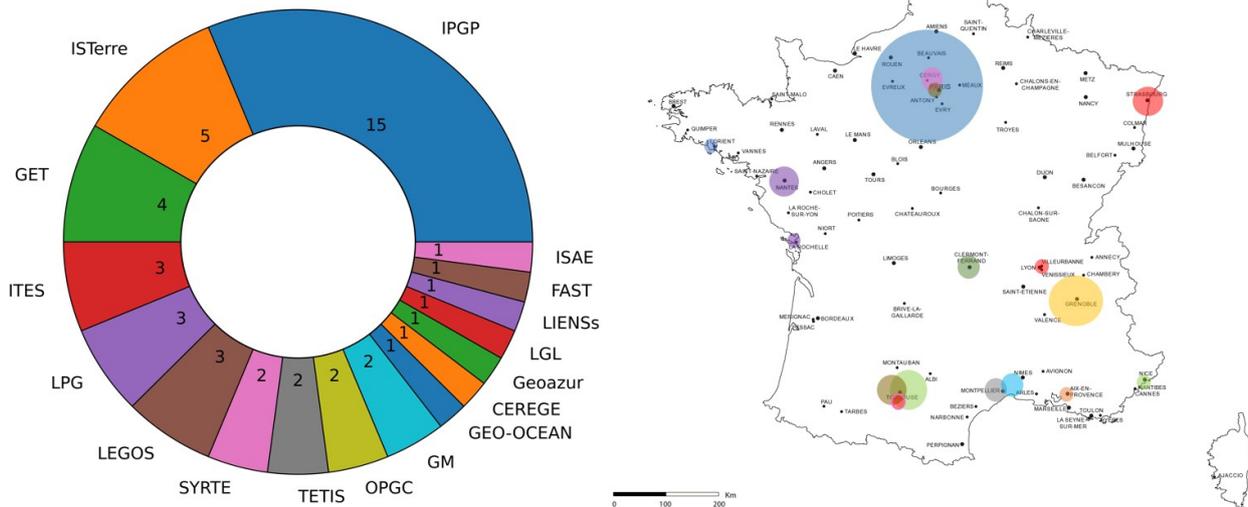


Fig. 10 : Répartition géographique et par institut du nombre de réponses à l'APR 2023. La taille des cercles est proportionnelle au nombre de projets évalués et la couleur à l'institut associé. IPGP - Institut de Physique du Globe de Paris, ISTerre - Institut des Sciences de la Terre, GET - Géosciences Environnement Toulouse, ITES - Institut Terre et Environnement de Strasbourg, LPG - Laboratoire de Planétologie et Géosciences, LEGOS - Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales, SYRTE - Système de Références Temps-Espace, TETIS - Territoire Environnement Télédétection Information Spatiale, OPGC - Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand, GM - Géosciences Montpellier, GEO-OCEAN - Université de Bretagne Sud, CEREGE - Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement, Geoazur - Nice, LGL - Laboratoire de Géologie de Lyon, LIENSs - Littoral ENVironnement et Sociétés, FAST - Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques, ISAE - Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace.

2.6.1. APPEL A PROPOSITIONS DE RECHERCHE

Le bilan synthétique et chiffré des APR est disponible dans les deuxième et troisième éditions du Livre Bleu qui couvrent la période 2019-2022. Seules quelques informations complémentaires sont mentionnées. Sur cette période, le nombre moyen de projets à évaluer est resté stable à environ 45 projets par an, avec un maximum de 61 projets en 2021, sans doute lié à un rattrapage post pandémie (Fig. 11).

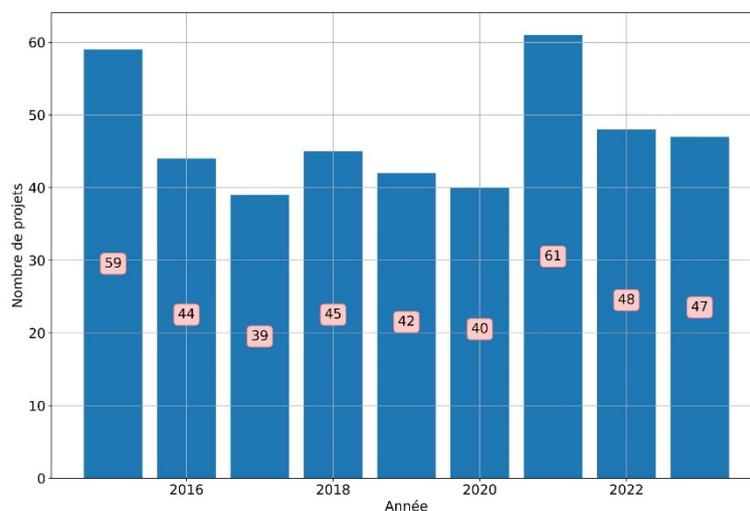


Fig. 11 : Evolution du nombre de projets évalués chaque année à l'APR TOSCA par le groupe thématique "Terre solide" entre 2015 et 2023.

Le groupe a apprécié la grande qualité et la diversité des projets soumis. Chaque année plus de 80%, 70% et 75% des projets obtiennent la note A respectivement pour la science, le budget et globalement. On peut noter une forte augmentation des demandes de CDD. La communauté a fait remonter deux difficultés : l'une associée au manque de fléchage des crédits (même ligne pour l'ensemble des projets d'un laboratoire) générant des problèmes de gestion, l'autre dû à la mise en place tardive des crédits qui rend délicat voire quasi-impossible la possibilité de rédiger un bilan à un an.

2.6.2. CONTRATS DE THESES ET POST-DOCTORAUX

Le domaine "Terre solide" gère chaque année une dizaine de demandes de financement de thèses et autant de demandes de postdocs. Le taux de financement est d'environ un tiers entre 2019 et 2023. On peut noter une légère baisse du nombre de demandes sur cette période. Une des difficultés est le demi-financement CNES pour les bourses de thèse, qui nécessite la recherche d'un contrat complémentaire, qui suivant les écoles doctorales et leurs calendriers propres, peut s'avérer difficile à obtenir.

3. REFERENCES

- 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>.
- Dyment, J., Choi, Y., Lesur, V., Garcia Reyes, A., Catalan, M., Ishihara, T., et al. (2023). World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM) v. 2.1 and the magnetic signature of geological provinces. In EGU General Assembly Conference Abstracts (EGU-9725). <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-9725>.
- Larochelle, S., Chanard, K., Dalaison, M., Fortin, J., Longuevergne, L., Fleitout, L., Argus, D., Gauer, L.-M., Jolivet, R. & Avouac, J.-P. (2023). The abrupt, drought-driven collapse of California's Sacramento Valley aquifer, submitted to Nature.
- 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>.
- Matoza, R. S., Fee, D., Assink, J. D., Iezzi, A. M., Green, D. N., Kim, K., et al. (2022). Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*, 377(6601), 95-100, <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>.
- Mouyen, M., Longuevergne, L., Steer, P., Crave, A., Lemoine, J. M., Save, H., & Robin, C. (2018). Assessing modern river sediment discharge to the ocean using satellite gravimetry. *Nature Communications*, 9(1), 3384, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05921-y>.
- Mouyen, M., Steer, P., Chang, K. J., Le Moigne, N., Hwang, C., Hsieh, W. C., ... & Masson, F. (2019). Quantifying sediment mass redistribution from joint time-lapse gravimetry and photogrammetry surveys. *Earth Surface Dynamics Discussions*, 2019, 1-37, <https://doi.org/10.5194/esurf-8-555-2020>.
- 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>.
- Provost, F., Malet, J.-P., Michéa, D., Déprez, A., Pointal, E., Pacini, F., ForM@Ter - EOST (2023): Terrain displacement from the Turkiye-Syria earthquakes of February 6, 2023 obtained with the GDM-OPT-ETQ service applied on Sentinel-2 optical imagery, <https://doi.org/10.25577/EWT8-KY06>.
- Thébault, E., Hulot, G., Langlais, B., & Vigneron, P. (2021). A spherical harmonic model of Earth's lithospheric magnetic field up to degree 1050. *Geophysical Research Letters*, 48(21), e2021GL095147, . <https://doi.org/10.1029/2021GL095147>.