

G2 2025 Géodésie et géophysique depuis l'espace

13-15 oct. 2025

Toulouse

France



Programme

Lundi 13 octobre 2025

13:30

Accueil des participants

13:45

Mot de bienvenue

14:00 – 14:30	Pierre Exertier (GET)	De Lageos à Genesis, de la gravité au climat, de Seasat à Swot, une évolution singulière
14:30 – 15 :00	Pierre Briole (ENS)	La campagne géodésique des Pyrénées de 1825 – 1827. Saison 1 : 1825, contexte, objectifs, reconnaissance.

Géodésie Spatiale

15:00 – 15:20	Alexandre Couhert (CNES/GET)	Gauging and Weighting the Earth System as a Whole to Uncover the Dynamics of Climate Change
15:20 – 15:40	Hanane Ait-Lakbir (GET)	Evaluation de la contribution de la mission GENESIS à la détermination du repère de référence terrestre par simulations numériques
15:40 – 16:00	Adrian Baños García (CLS)	GEOD-ESIS : Combinaisons tri-techniques pour améliorer la réalisation du Système de Référence Terrestre
16:00 – 16:30		Pause café
16:30 – 16:50	Yuting Cheng (ROB)	Basic Earth Parameters from VLBI observations using Bayesian inversions in time domain: updated insights of the Earth's interior
16:50 – 17:10	Alexandre Boughanemi (Magellium)	Développement de produits et services gravimétriques au CNES dans le cadre du projet SAGSA
17:10 – 17:30	Laurent Soudarin (CLS)	Applications scientifiques de DORIS et activités du Service International DORIS
17:30 – 18:00		Présentations posters 2 min

Imagerie / DEM

09:00 – 09:20	Laurent Lebegue (CNES)	La mission CO3D, cartographier la Terre en 3D
09:20 – 09:40	Valentine Bellet (CNES)	Outils 3D open-source développés pour la mission CO3D
09:40 – 10:00	Antoine Lucas (IPGP)	Earth-surface dynamics with satellite DEM time series: cross-scale insights and CO3D/4D-Earth perspective
10:00 – 10:20	Amaury Dehecq (IGE)	Historical Images for Surface Topography Reconstruction Intercomparison eXperiment (Historix)
10:20 – 10:50		Pause café
10:50 – 11:10	Joaquin Belart (IES)	Mapping and monitoring of Iceland with Pléiades since 2013: applications in geosciences
11:10 – 11:30	Imen Brini (LISAH)	Mitigating co-registration and jitter artifacts for multi-temporal DEM change detection with Pléiades satellite elevation data
11:30 – 11:50	Valentine Bellet (CNES) & Alice de Bardonneche Richard (CS-Group)	Fédération xDEM/demcompare : Vers un outil unifié pour l'analyse des modèles numériques d'élévation (MNE)
11:50 – 12:10	Anne Guyez (LEGOS)	Pléiades Glacier Observatory : using Pléiades satellite imagery to estimate glacier mass balance
12:10 – 12:30	Maud Bernat (LEGOS)	Mass losses of the antarctic peninsula. New constraints from stereoscopic imagery and laser altimetry.

12 :30 – 14 :00

Pause déjeuner

Positionnement GNSS

14:00 – 14:20	Georgia Katsigianni (CLS)	Produits GNSS du centre d'analyse IGS CNES/CLS pour les applications géodésiques et géophysiques
14:20 – 14:40	Alvaro Santamaría-Gómez (CNES/GET)	Monitoring the Earth's deformation with the SPOTGINS series
14:40 – 15:10	Médéric Gravelle (LIENSs)	Champ de vitesses GNSS à la côte à partir de produits SPOTGINS: résultats, évaluation, application
15:10 – 15:30	Julien Barnéoud (IGN)	Architecture et fonctionnalités d'une base de données de métadonnées multi-sources et interopérable pour le traitement et l'analyse de séries temporelles GNSS

15:30 – 16:00		Pause café
16:00 – 16:20	Pierre Bosser (ENSTA)	Évaluation des données GNSS du réseau collaboratif CentipedeRTK pour les géosciences
16:20 – 16:40	Clément Gazzino (CNES)	GNSS satellite hardware biases stability over time: analysis of the products from several analysis centers

16:40 – 17:30

Session poster

Posters

Julien Barnéoud (IGN)	ALIEDOCS: the Awesome Load-Induced Earth Deformation Online Computation Service
Suzanne Blondel (CNES)	Assessment of self-shadowing effect on the SWOT satellite
Gaël Andre (SHOM)	Cal/Val SWOT : Apport des produits troposphériques GNSS issus de campagnes océanographiques
Léonie Leroux (IGN)	Etude de la séquence de Totoral de 2020 dans la région d'Atacama (Chili), à partir de séries temporelles InSAR FLATSIM
Julia Pfeffer (Magellium)	Identification of defects in satellite gravimetry solutions with artificial intelligence
Pierre Bosser (ENSTA)	Instrumentation géodésique pour le suivi du niveau d'eau et la cal/val satellite : application au Lac de Guerlédan (France)
Anthony Memin (GEOAZUR)	Le Service National d'Observation Gravimétrie
Louis-Marie Gauer (LEGOS)	MILLS: Mitigation Leakage through Least Square -- A new method to estimate regional mass variations from GRACE/-FO
Lucie Rolland (GEOAZUR)	Satellite observations of the 2023 Loyalties Island, 2025 Drake Passage and Kamchatka Tsunamis
Anthony Memin (GEOAZUR)	Using joint geodetic data to estimate viscous surface velocities in Antarctica due to past and recent ice sheet changes
Samuel Nahmani (IGN)	singugins: un container pour le calcul GNSS massif compatible SPOTGINS

19:30

Diner du colloque (informations à venir)



Niveau de la mer / Climat

09:00 – 09:20	Jonathan Chenal (IGN)	Evaluation et connexion de systèmes altimétriques par nivellement hydrodynamique
09:20 – 09:40	Aurélien Pira (LIENSs)	Filtrage de Kalman étendu appliqué à l'observation haute fréquence du niveau de la mer par interférométrie GNSS
09:40 – 10:00	Guillaume Ramillien (GET)	Projet HYDROFAST : étude des phénomènes transitoires en Polynésie Française par réflectométrie GNSS
10:00 – 10:20	Arthur Avenas (ESA)	Characterizing the tropical cyclone dynamics from Earth observation data synergy
10:20 – 10:50		Pause café
10:50 – 11:10	John Moyard (CNES)	Observations actuelles et prochains défis pour le calcul d'orbite des missions altimétriques
11:10 – 11:30	Julia Pfeffer (Magellium)	Impact des futures missions de gravimétrie spatiale sur la fermeture du bilan de la mer
11:30 – 11:50	Ramiro Ferrari (Magellium)	Estimating the earth energy imbalance with geodetic data to assess global and regional Earth energy budget
11:50 – 12:10	Maxime Rousselet (GET)	Le changement actuel du niveau barystatique de la mer est sous-estimé à cause de la réponse de la Terre solide aux redistributions de masse du dernier siècle
12:10 – 12:30	Florent Cambier (GET)	Oscillations annuelles et interannuelles des variations de masse de la calotte groenlandaise avec GRACE(-FO), liées aux indices climatiques

Table des matières

programme _G2.pdf	1
Géodésie spatiale	5
Evaluation de la contribution de la mission GENESIS à la détermination du repère de référence terrestre par simulations numériques, Hanane Ait-Lakbir [et al.] . . .	6
GEOD-ESIS : Combinaisons tri-techniques pour améliorer la réalisation du Système de Référence Terrestre, Adrian Banos Garcia [et al.]	7
Développement de produits et services gravimétriques au CNES dans le cadre du projet SAGSA, Alexandre Boughanemi [et al.]	8
La campagne géodésique des Pyrénées de 1825-1827. Saison 1: 1825, contexte, objectifs, reconnaissance, Pierre Briole	10
Basic Earth Parameters from VLBI observations using Bayesian inversions in time domain: updated insights of the Earth's interior, Yuting Cheng [et al.]	11
Applications scientifiques de DORIS et activités du Service International DORIS, Laurent Soudarin [et al.]	12
Gauging and Weighting the Earth System as a Whole to Uncover the Dynamics of Climate Change, Alexandre Couhert	13
Imagerie / DEM	14
Mapping and monitoring of Iceland with Pléiades since 2013: applications in geosciences, Joaquin Belart	15
Fédération xDEM/demcompare : Vers un outil unifié pour l'analyse des modèles numériques d'élévation (MNE), Valentine Bellet [et al.]	16

Outils 3D open-source développés pour la mission CO3D, Valentine Bellet [et al.]	18
MASS LOSSES OF THE ANTARCTIC PENINSULA. NEW CONSTRAINTS FROM STEREOSCOPIIC IMAGERY AND LASER ALTIMETRY., Maud Bernat [et al.]	20
Mitigating co-registration and jitter artifacts for multi-temporal DEM change detection with Pléiades satellite elevation data, Imen Brini [et al.]	21
Historical Images for Surface Topography Reconstruction Intercomparison eXperiment (Historix), Amaury Dehecq [et al.]	23
Pléiades Glacier Observatory : using Pléiades satellite imagery to estimate glacier mass balance, Anne Guyez [et al.]	24
La mission CO3D, cartographier la Terre en 3D, Laurent Lebegue	25
Earth-surface dynamics with satellite DEM time series: cross-scale insights and CO3D/4D-Earth perspective, Antoine Lucas [et al.]	26
Positionnement GNSS	28
Architecture et fonctionnalités d'une base de données de métadonnées multi-sources et interopérable pour le traitement et l'analyse de séries temporelles GNSS, Julien Barnéoud [et al.]	29
Évaluation des données GNSS du réseau collaboratif CentipedeRTK pour les géosciences, Pierre Bosser [et al.]	31
GNSS satellite hardware biases stability over time: analysis of the products from several analysis centers, Clément Gazzino [et al.]	33
Champ de vitesses GNSS à la côte à partir de produits SPOTGINS: résultats, évaluation, application, Médéric Gravelle [et al.]	34
Produits GNSS du centre d'analyse IGS CNES/CLS pour les applications géodésiques et géophysiques, Georgia Katsigianni [et al.]	35
Monitoring the Earth's deformation with the SPOTGINS series, Alvaro Santamaría-Gómez [et al.]	36
Niveau de la mer / Climat	37
Characterizing the tropical cyclone dynamics from Earth observation data synergy, Avenas Arthur [et al.]	38

Oscillations annuelles et interannuelles des variations de masse de la calotte groenlandaise avec GRACE(-FO), liées aux indices climatiques, Florent Cambier [et al.]	40
Evaluation et connexion de systèmes altimétriques par nivellement hydrodynamique, Jonathan Chenal [et al.]	41
Estimating the earth energy imbalance with geodetic data to assess global and regional Earth energy budget, Ramiro Ferrari [et al.]	42
Observations actuelles et prochains défis pour le calcul d'orbite des missions altimétriques, John Moyard [et al.]	43
Impact des futures missions de gravimétrie spatiale sur la fermeture du bilan de la mer, Julia Pfeffer [et al.]	44
FILTRAGE DE KALMAN ÉTENDU APPLIQUÉ À L'OBSERVATION HAUTE FRÉQUENCE DU NIVEAU DE LA MER PAR INTERFÉROMÉTRIE GNSS, Aurélien Pira [et al.]	45
Projet HYDROFAST : étude des phénomènes transitoires en Polynésie Française par réflectométrie GNSS, Guillaume Ramillien [et al.]	47
Le changement actuel du niveau barystatique de la mer est sous-estimé à cause de la réponse de la Terre solide aux redistributions de masse du dernier siècle, Maxime Rousselet [et al.]	48
Poster	50
Cal/Val SWOT : Apport des produits troposphériques GNSS issus de campagnes océanographiques, Aurélie Panetier [et al.]	51
ALIEDOCS: the Awesome Load-Induced Earth Deformation Online Computation Service, Julien Barnéoud [et al.]	52
Assessment of self-shadowing effect on the SWOT satellite, Suzanne Blondel [et al.]	53
Instrumentation géodésique pour le suivi du niveau d'eau et la cal/val satellite : application au Lac de Guerlédan (France), Clemence Chupin [et al.]	54
MILLS: MITigation Leakage through Least Square – A new method to estimate regional mass variations from GRACE/-FO, Louis-Marie Gauer [et al.]	56
Etude de la séquence de Totoral de 2020 dans la région d'Atacama (Chili), à partir de séries temporelles InSAR FLATSIM, Léonie Leroux [et al.]	58

Using joint geodetic data to estimate viscous surface velocities in Antarctica due to past and recent ice sheet changes, Anthony Memin [et al.]	59
Le Service National d’Observation Gravimétrie, Anthony Memin [et al.]	60
Identification of defects in satellite gravimetry solutions with artificial intelligence, Thomas Vaujour [et al.]	61
Satellite observations of the 2023 Loyalties Island, 2025 Drake Passage and Kamchatka Tsunamis, Lucie Rolland [et al.]	62
Liste des sponsors	62

Géodésie spatiale

Evaluation de la contribution de la mission GENESIS à la détermination du repère de référence terrestre par simulations numériques

Hanane Ait-Lakbir *¹, Chatzinikos Miltiadis², Pacôme Delva³,
Jean-Charles Marty^{1,4}, Arnaud Pollet^{5,6}

¹ Géosciences Environnement Toulouse – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l’Univers, Centre National d’Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Laboratoire Temps Espace (LTE) – LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, 61 avenue – France

³ Laboratoire Temps Espace (LTE) – LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, France – France

⁴ Centre National d’études Spatiales [Toulouse] – Centre National d’Etudes Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France

⁵ IPGP – Université Paris Cité, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, IGN, F-75005 Paris, France – France

⁶ École nationale des sciences géographiques – Institut National de l’Information Géographique et Forestière [IGN], Université Gustave Eiffel – France

La mission spatiale GENESIS de l’ESA, dont le lancement est prévu pour 2028, a pour objectif d’améliorer la réalisation des repères de référence géodésiques grâce à la colocalisation de quatre techniques spatiales sur un même satellite : DORIS, GNSS, SLR et VLBI.

Dans ce cadre, nous avons développé des simulations numériques utilisant le logiciel GINS (CNES). Nos analyses intègrent également la modélisation d’erreurs réalistes spécifiques à chaque technique, permettant d’évaluer l’apport potentiel de GENESIS à la détermination des paramètres fondamentaux du repère de référence terrestre (TRF, Terrestrial Reference Frame).

Cette présentation exposera nos premiers résultats. D’abord, nous montrerons la contribution de GENESIS à la détermination de l’origine et du facteur d’échelle du TRF par l’analyse des solutions individuelles de chaque technique, en particulier à la définition et la précision interne des paramètres et l’observabilité du mouvement annuel de l’origine. Puis, nous présenterons les résultats de l’utilisation de l’orbite commune de GENESIS comme lien inter-technique lors de la détermination multi-technique des paramètres du TRF.

*Intervenant

GEOD-ESIS : Combinaisons tri-techniques pour améliorer la réalisation du Système de Référence Terrestre

Adrian Banos Garcia * ¹, Sylvain Loyer ¹, Guilhem Moreaux ¹, Capdeville
Hugues ¹, Eleonore Saquet ¹, Adrian Mezerette ¹

¹ Collecte Localisation Satellites – Collecte Localisation Satellites, Collecte Localisation Satellites –
France

En prévision de la mission Genesis nous avons réalisé des solutions tri-techniques - GNSS, DORIS et SLR - de plusieurs missions altimétriques (Sentinel-6A, Sentinel-3A/B). La méthode utilisée est une combinaison journalière au niveau des équations normales en conservant les paramètres communs aux 3 techniques (pôle, orbite). Cette méthode facilite les études et les réglages : pondérations relatives, choix des contraintes minimales de non rotation globale du réseau, influence des différents satellites, stabilité des centres de phase, etc. Nous évaluons l'impact de chaque technique sur les solutions diurnes réseaux et le géocentre observé. Cette combinaison, qui réduit le nombre de degrés de liberté, permet d'améliorer significativement les solutions individuelles ainsi que la détermination du géocentre, tant en termes d'incertitude formelle que de WRMS par rapport aux solutions de référence.

*Intervenant

Développement de produits et services gravimétriques au CNES dans le cadre du projet SAGSA

Alexandre Boughanemi * ¹, Claude Boniface ², Alejandro Blazquez ³,
Michaël Ablain ¹, Marie Bouih ⁴, Sean Bruinsma ⁵, Alexandre Couhert ⁵,
Gerald Dibarboure ⁶, Joel Dorandeu ⁷, Sébastien Gaugain ⁶, Emeric
Lavergne ⁶, Hugo Lecomte ⁸, Jean-Michel Lemoine ⁵, Benoit Meyssignac ⁹,
Eric Pellereau ¹, Julia Pfeffer ¹⁰, Franck Reinquin ¹¹, Lionel Zawadski ⁶

¹ Magellium – Magellium, Ramonville Saint-Agne, France – France

² Centre National des Etudes Spatiales – Centre National d’Etudes Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France

³ Laboratoire d’études en Géophysique et océanographie spatiales – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l’Univers, Centre National d’Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁴ Magellium – CNES, Magellium, Ramonville Saint-Agne, France – France

⁵ Géosciences Environnement Toulouse – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l’Univers, Centre National d’Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁶ Centre National d’études Spatiales [Toulouse] – Centre National d’Etudes Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France

⁷ Magellium – Magellium – France

⁸ LEGOS, Université de Toulouse – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l’Univers, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National d’Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁹ Laboatoire d’Etudes en géophysique et océanographie spatiales (LEGOS) – CNRS : UMR5566, Centre national d’études spatiales - CNES (FRANCE), Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR5566, Université de Toulouse Paul Sabatier – France

¹⁰ Magellium – NA – Parc technologique du Canal, 1, rue Ariane, 31520 Ramonville Saint-Agne, France

¹¹ Centre National d’Études Spatiales [Toulouse] – Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Observatoire Midi-Pyrénées, Université Paul Sabatier [UPS] - Toulouse III, CNRS: UMR5563 – France

Depuis plus de deux décennies, le CNES développe et diffuse des modèles de gravité variables dans le temps de niveau 2 auprès de la communauté scientifique internationale, notamment via l’International Center for Global Gravity Field Models (ICGEM) et l’International Combination Service for Time-variable Gravity Fields (COST-G). Le projet SAGSA (Service d’Activités en Gravimétrie Spatiale et Applications), dans le cadre du pôle national de données et services FormaTerre de l’infrastructure de recherche Data Terra, fondé par le CNES et piloté par Magellium, se place dans la continuation de cet exercice. Le projet a pour objectif de mettre en place un Centre de Données et Services en Gravimétrie Spatiale. Ce centre sera dédié au suivi des variations temporelles et spatiales du champ de gravité terrestre à partir des observations GRACE et GRACE-FO, ainsi qu’à la mise à disposition de produits gravimétriques avancés pour la commu-

*Intervenant

nauté scientifique. Dans le cadre de SAGSA, Magellium, en étroite collaboration avec le CNES, est chargé de la production opérationnelle des modèles de gravité nominaux et non contraints de niveau 2 du CNES, distribués à la fois sous forme d'harmoniques sphériques et de produits maillés. Ces modèles constituent la base des modèles d'ensemble de niveau 3, obtenus par combinaison des solutions du CNES avec celles d'autres centres de traitement, afin de fournir des jeux de données adaptés aux besoins des communautés en hydrologie, océanographie, déformations de la terre solide et glaciologie. Ces modèles permettent l'étude de processus géodynamiques à grande échelle, tels que le cycle global de l'eau, la fonte des glaces continentales et l'élévation du niveau de la mer. Par ailleurs, des produits de niveau 4 sont développés en combinant la gravimétrie spatiale avec d'autres données d'observation de la Terre, comme l'altimétrie satellitaire, pour le suivi de variables climatiques essentielles telles que le contenu thermique des océans et le déséquilibre énergétique de la Terre. Enfin, SAGSA mettra en place une infrastructure dédiée de données et services, assurant l'identification, la diffusion et la documentation systématiques de l'ensemble des produits gravimétriques du CNES, du niveau 1B au niveau 4.

La campagne géodésique des Pyrénées de 1825-1827. Saison 1: 1825, contexte, objectifs, reconnaissance

Pierre Briole * ¹

¹ Laboratoire de Géologie (LG) – CNRS : UMR8538, Ecole Normale Supérieure de Paris - ENS Paris, Université de recherche Paris Sciences Lettres (PSL) – 45 Rue d’Ulm 75005 Paris, France

Au cours de ses campagnes, Napoléon avait acquis une conscience aiguë de l’importance des cartes et s’était entouré de brillants ingénieurs géographes formés dans la jeune École polytechnique. En 1807, il confie au chevalier Bonne la mission de faire des propositions pour l’élaboration d’une nouvelle carte de la France. En février 1808, Bonne lui fournit un mémoire détaillé en vue de ces travaux.

Ce projet ne put cependant pas être mis en œuvre au cours des années suivantes. Il réapparut sous le règne de Louis XVIII sous la forme d’un nouveau projet rédigé par le commandant Denaix, qui recommandait la création d’une carte qui ne répondrait pas qu’aux seuls besoins militaires, mais aussi aux besoins de tous les services publics de l’État. Le projet de Denaix fut ensuite porté en 1817 par Laplace auprès du gouvernement. Ce dernier reconnut l’intérêt d’une telle entreprise et mit en place le 11 juin 1817 une commission chargée d’" examiner le projet d’une nouvelle carte de France, appropriée à tous les services publics et combinée avec les opérations du cadastre général, ainsi que d’en poser les bases et le mode d’exécution ".

La campagne géodésique des Pyrénées trouve ses racines dans les travaux de cette commission. Comme l’avait proposé Denaix, le canevas géodésique de la carte s’appuya sur un ensemble de méridiennes – celle tracée par Delambre et Méchain occupant la place centrale – et de perpendiculaires à ces méridiennes. Tous ces réseaux étaient formés de triangles dont la longueur typique des côtés était de 30 km. Le réseau des Pyrénées constitue la perpendiculaire la plus méridionale de France : elle s’appuie à l’est sur la méridienne de Delambre et Méchain et se relie à l’ouest, via un ensemble de points remontant vers le nord, à la perpendiculaire de Rodez.

Si la planimétrie constituait l’élément de départ de la définition du réseau, l’altimétrie était aussi au cœur des préoccupations. Cela était nécessaire avant tout pour que la carte soit précise en altimétrie, mais aussi, dans le cas de cette perpendiculaire, pour un besoin scientifique particulier : vérifier si l’altitude des deux mers, de part et d’autre des Pyrénées, telle qu’elle découlerait des mesures, serait ou non la même.

Les travaux furent placés sous la direction du lieutenant-colonel Corabœuf. L’année 1825, dont nous parlerons cette année, fut consacrée à la préparation de la campagne et à la reconnaissance du réseau.

*Intervenant

Basic Earth Parameters from VLBI observations using Bayesian inversions in time domain: updated insights of the Earth's interior

Yuting Cheng ^{*} ¹, Veronique Dehant ^{1,2}, Christian Bizouard ³, Attilio Rivoldini ¹

¹ Royal Observatory of Belgium = Observatoire Royal de Belgique – Belgique

² Université Catholique de Louvain – Belgique

³ Laboratoire Temps Espace, Observatoire de Paris – Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire de Paris, Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Lille, Sorbonne Université, Laboratoire National de Métrologie et d'Essais – France

We present updated estimates of Basic Earth Parameters (BEP) from VLBI Celestial Pole Offset (CPO) time series spanning 1980-2025 using ensemble Markov Chain Monte-Carlo Bayesian inversion. Building upon Koot et al(2008), we employ enhanced sampling algorithms and incorporate recent advances in ocean tidal modelling (Cheng & Bizouard (2025)). Key improvements include: (1) implementation of piece-wise cubic spline modeling for Free Core Nutation (FCN) amplitude variations, which significantly reduces multimodality in MCMC sampling compared to linear modeling; (2) integration of updated Ocean Tidal Angular Momentum (OTAM) values from FES2014 ocean tidal atlas Lyard et al (2021) without the empirical 0.7 scaling factor previously applied; and (3) utilization of five diverse CPO series from different analysis centers spanning up to 45 years of observations.

Our results show good consistency across different CPO series, with estimated dynamical ellipticity values at the edge of the 1σ range of MHB 2000. Notable findings include a larger absolute value for the imaginary part of the core-mantle boundary coupling constant $\text{Im}(K_CMB)$, approaching the 2σ boundary of MHB 2000, which may reflect contributions from multiple coupling mechanisms including topographic coupling through internal wave excitation. The real part of the inner core boundary coupling constant $\text{Re}(K_ICB)$ is approximately half the MHB 2000 value, potentially indicating the need to revisit hydrostatic assumptions for the inner core given recent seismic evidence of viscous deformation. Compliance estimates suggest that frequency extrapolation methods from seismic to nutation bands require revision. The enhanced FCN modeling successfully captures amplitude variations that differ from empirical models, particularly after 2000, though the physical interpretation of these differences requires further investigation.

The systematic discrepancies across multiple parameters suggest that current nutation theory needs substantial updates to incorporate more realistic models of core-mantle coupling and inner core behavior.

*Intervenant

Applications scientifiques de DORIS et activités du Service International DORIS

Laurent Soudarin * ¹, Guilhem Moreaux ¹, Hugues Capdeville ¹, Cécile Manfredi ²

¹ CLS - Service Localisation et Orbitographie – CLS-TRE-ALTAMIRA – France

² CNES - Service Applications des missions Terre et Atmosphère – Centre National d'Etudes Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France

DORIS est l'une des quatre techniques qui contribuent à la réalisation du système de référence international (ITRF). A ce titre, elle sera à bord de la future mission Genesis. La technique a été initialement développée pour répondre aux besoins de détermination d'orbite des satellites LEO, notamment la série des satellites altimétriques océaniques, mais elle est également adaptée à des applications scientifiques en géodésie et géophysique.

Le Service international DORIS (IDS) a été créé en 2003 en tant que service de l'IAG afin de fédérer les recherches et les développements liés à DORIS, d'organiser la contribution DORIS à l'IERS et au GGOS, et de favoriser une plus grande coopération internationale autour de cette technique.

De nouveaux groupes ont approché l'IDS ces dernières années, apportant de nouvelles capacités de traitement ou souhaitant s'impliquer dans le traitement DORIS à moyen terme. Ces nouvelles forces ouvrent également de nouvelles applications. Depuis juillet 2024, les données DORIS sont fournies à l'IDS en temps quasi réel (NRT), c'est-à-dire avec un délai de 3 heures maximum après leur acquisition par les récepteurs DGXX de Cryosat-2, Jason-3, HY-2C, HY-2D, Saral, Sentinel-3A, Sentinel-3B, Sentinel-6A et Swot. Elles sont principalement destinées à être utilisées par le groupe de travail " Applications ionosphériques NRT ", dont l'objectif est de promouvoir l'utilisation des données DORIS NRT pour les applications ionosphériques. L'IDS a également mis en place le groupe de travail " Stratégies intégrées de correction d'horloge pour DORIS ", qui vise à étudier le comportement des horloges DORIS en exploitant les colocalisations des horloges DORIS dans l'espace et au sol. Son objectif est de dériver des méthodes permettant de mieux modéliser le comportement de l'USO DORIS et de réduire une source d'erreur systématique dans la technique DORIS.

Cette présentation offre un panorama des applications scientifiques de DORIS et des activités de l'IDS.

*Intervenant

Gauging and Weighting the Earth System as a Whole to Uncover the Dynamics of Climate Change

Alexandre Couhert * 1,2

¹ CNES – Centre National d’Études Spatiales (Toulouse, France) – France

² Géosciences Environnement Toulouse – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Centre National d’Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique – France

Wondering about the right and most important observable to deal with major science questions, the Global Climate Observing System (GCOS) defined 55 Essential Climate Variables (ECVs). If global changes can already be well addressed from this broad overview, some ECVs interacting with different Earth’s spheres are yet missing. In response to the alarming acceleration of global warming, the concept of Geodetic Climate Variables has emerged to theoretically connect the geodetic observables to the different processes influencing the Earth’s water-energy cycle variability that they can constrain.

In recent decades, anthropogenic emissions of greenhouse gases (GHGs) have been the main cause of a positive imbalance between solar radiative heating and infrared radiative cooling at the top of the atmosphere (TOA), generating an accumulation of energy in the climate system and causing global warming, melting glaciers and polar ice caps, rising sea levels and more extreme weather conditions, impacting the planet as a whole. Since such global change phenomena are small and their temporal evolutions are slow and even smaller, achieving a quantitative understanding of the Earth’s climate necessitates a foundation of precise, comprehensive and globally consistent observations of its water– energy cycle (in the atmosphere, as well as in the ocean, on land and below the surface).

The main goal of this paper is to show the complicated problem of aliasing and inversion that is faced and a possible way to handle this issue, addressing both the space and ground segments, as well as geophysical background models, as if all the derived knowledge was built consistently in one observatory encompassing the Earth. Starting from our efforts to improve the modeling of radiation and gravitational forces acting on satellites, while characterizing systematic tracking technique errors for geocentric sea level rise estimates relying on Precise Orbit Determination (POD), we will then detail our involvement in two additional applications where the satellite itself becomes the sensor through orbit perturbations, for the recovery of the Earth’s radiative Energy Imbalance (EEI) and integrated large-scale mass transport processes at stake. Finally, we will exhibit the results of our recent work on constraining geophysical models (using geodetic observations), as well as their uncertainties, that are necessary for the separation and quantification of the previously mentioned physical phenomena.

*Intervenant

Imagerie / DEM

Mapping and monitoring of Iceland with Pléiades since 2013: applications in geosciences

Joaquin Belart * 1,2

¹ Institute of Earth Sciences, University of Iceland – Reykjavik, Islande

² National Land Survey of Iceland – Akranes, Iceland, Islande

Since near the launch of the Pléiades satellites in 2011-12, Iceland has been closely revisited and mapped by Pléiades. One of the main targets has been the monitoring of the glacier surfaces and their surroundings, mainly due to the capabilities of the satellite to measure the snow and the affordable costs via research platforms such as DINAMIS, CEOS or CIEST2. Since 2020, every summer we collect > 1,000 km² of glacierized surfaces in Iceland, which has led to the mapping of all the Icelandic glaciers between 2020 and 2023. Besides this, we have also used Pléiades for the monitoring of several volcanic eruptions, from 2014 up to present, notably the eruptions of Bárðarbunga (in 2014), Fagradalsfjall (in 2021-2023) and Súnhnúkarsgígar (2023-present). We also use Pléiades for monitoring slope instabilities in the vicinity of glaciers, as well as to monitor the changes in geothermal areas in ice-covered areas and the subsequent floodings (jökulhlaups) that are caused by these geothermal areas. This presentation provides an overview of 12 years of data collection and some of the main findings done with Pléiades in Iceland in the past decade.

*Intervenant

Fédération xDEM/demcompare : Vers un outil unifié pour l'analyse des modèles numériques d'élévation (MNE)

Valentine Bellet ^{*} ¹, Alice De Bardonneche Richard ^{*}

², Amaury Dehecq ^{*}

, Romain Hugonnet ³, Emmanuel Dubois ¹, Valentin Schaffner ¹, Marine Bouchet ⁴

¹ Centre National d'études Spatiales [Toulouse] – Centre National d'Etudes Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France

² CS Group - SI Toulouse [France] – CS Group - SI Toulouse [France] – France

³ University of Alaska Fairbanks – États-Unis

⁴ CS Group - SI Toulouse [France] – CS Group - SI Toulouse [France] – France

En 2020, deux outils open-source se sont développés parallèlement pour l'analyse des modèles numériques d'élévation (MNE) : demcompare, conçu pour la qualification des MNE produits par le CNES dans le cadre de la mission CO3D, et xDEM, développé par le collectif GlacioHack pour l'étude des changements affectant les glaciers. Bien que reposant sur une base technique commune (Python, traitement de MNE), ces outils diffèrent : xDEM est une boîte à outils flexible dédiée à la recherche, tandis que demcompare est un pipeline automatisé conçu pour des applications opérationnelles.

En 2023, le CNES et GlacioHack ont engagé un dialogue pour explorer les synergies possibles entre ces deux développements. Cette collaboration a abouti en 2024 à une étude approfondie menée par CS-Group sur une période de 10 mois. L'audit complet réalisé (juridique, social, informatique/algorithmique) a démontré l'intérêt stratégique de concentrer les efforts sur xDEM, tout en intégrant les fonctionnalités clés de demcompare. Suite à cet audit, le collectif GlacioHack et CNES-CS ont commencé leurs efforts de fédération sous une nouvelle gouvernance groupée de xDEM.

Aujourd'hui, xDEM, désormais enrichi des fonctionnalités différenciantes de demcompare, est devenu un outil polyvalent pour l'analyse des MNE. Ses principales fonctionnalités incluent la co-registation de MNE (transformations affines et non affines), le référencement vertical, le calcul d'attributs de terrain (pente, ombre, etc.), l'interpolation, l'analyse d'incertitude, et le calcul de statistiques. L'outil est désormais utilisé pour la qualification des MNE dans le cadre de la mission CO3D, tout en restant un outil de recherche actif.

^{*}Intervenant

Cette présentation démontrera les capacités de xDEM à travers des cas concrets et détaillera le processus de fédération. Enfin, nous discuterons des perspectives d'évolution de xDEM et de son intégration dans les communautés scientifiques et opérationnelles.

Outils 3D open-source développés pour la mission CO3D

Valentine Bellet ^{*} ¹, Alexandre Constantin ¹, Dimitri Lallement ¹, Yannick Tanguy ¹, David Youssefi ^{*}

1

¹ Centre National d'Études Spatiales [Toulouse] – Centre National d'Études Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France

Après plusieurs années de développement, la mission CO3D (" Constellation Optique en 3D ") a été lancée avec succès le 25 juillet 2025. Le projet CO3D est un partenariat public-privé entre le CNES et AIRBUS. La mission vise à lancer des paires de satellites optiques pour reconstruire le Modèle Numérique de Surface (MNS) de la surface émergée de la Terre par photogrammétrie. Une des principales innovations est la possibilité de gérer l'acquisition stéréo en mode synchrone pour capturer des éléments en mouvement.

Dans le cadre du programme CO3D, le CNES développe les chaînes de traitement des produits 2D et 3D intégrées au segment sol de la mission, ainsi qu'un Centre de Calibration d'Images (ICC) pour la calibration radiométrique et géométrique. Ces systèmes s'appuient sur une suite d'outils open-source créés par les équipes du CNES. Le CNES a choisi de diffuser ces outils avant le lancement de la mission afin de recueillir les retours des utilisateurs et d'améliorer la qualité des produits finaux du programme CO3D.

CARS est le logiciel de reconstruction de type Multi-View Stereo (MVS) permettant de produire des MNS à partir d'images satellites acquises sous différents angles de vue. Il interagit avec différents logiciels:

PANDORA est le logiciel de mise en correspondance stéréoscopique. Il combine à la fois une étape de mesure de similarité au niveau des pixels et une étape de régularisation spatiale. PANDORA est au cœur du pipeline de CARS.

BULLDOZER supprime les éléments du sursol (les arbres, les bâtiments, etc.) dans les MNS générés par CARS pour produire des Modèles Numériques de Terrain (MNT).

XDEM évalue et valide la qualité 3D des modèles générés, comme par exemple les MNS CARS et les MNT BULLDOZER.

SLURP produit des masques d'occupation du sol à partir d'images à Très Haute Résolution (THR). Le pipeline CARS intègre ces masques pour générer des reconstructions 3D plus nettes. La mission CO3D marque une avancée significative dans l'observation de la Terre, avec des outils

*Intervenant

innovants permettant de produire des modèles de surface précis. En s'engageant avec la communauté des utilisateurs dès le début, le CNES vise à s'assurer que la mission fournit des produits répondant aux besoins des utilisateurs.

MASS LOSSES OF THE ANTARCTIC PENINSULA. NEW CONSTRAINTS FROM STEREOSCOPIC IMAGERY AND LASER ALTIMETRY.

Maud Bernat ^{*} ¹, Etienne Berthier ¹, Joaquín Belart ², Amaury Dehecq ³,
Youssefi David ⁴

¹ Laboratoire d'études en Géophysique et océanographie spatiales – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National d'Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Natural Science Institute of Iceland – Islande

³ Institut des Géosciences de l'Environnement – Institut de Recherche pour le Développement, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, observatoire des sciences de l'univers de Grenoble, Université Grenoble Alpes, Institut Polytechnique de Grenoble - Grenoble Institute of Technology – France

⁴ Centre National d'études Spatiales [Toulouse] – Centre national d'études spatiales - CNES (FRANCE) – France

Along with glaciers, polar ice sheets are a strong contributor to sea level rise and their losses are accelerating. Since 2012, intercomparison exercises have combined estimates of ice sheet mass change from various methods : gravimetry, altimetry and input/output method/ However, the consensus displayed in these inter-comparisons hides sometimes strong divergences between these different methods because each one presents drawbacks. In particular, the altimetry method, whether based on radar or laser measurements, has a resolution of generally one kilometer. This resolution, although perfectly suited in the central and flat areas of the polar ice sheets, does not allow to solve the complexity of the elevation changes of the coastal glaciers, especially along the sloping coasts of the Antarctic Peninsula and Greenland. Yet, it is at their margins that ice sheets respond dynamically to rising atmospheric and oceanic temperatures. The objective of the study is to build high resolution estimates of ice sheet elevation changes. It exploits an archive of stereo pairs acquired by the SPOT5-HRS sensor mostly during the International Polar Year (IPY, 2007-2009) to build a topography of the polar ice sheet periphery. A vertical correction of each digital terrain model (DEMs) is performed using the elevation measurements, partly simultaneous, of the ICESat laser altimeter (2003-2008). This IPY topography is then used as a reference to estimate more than 15 years of volume changes of the ice sheet periphery by comparison with measurements from recent missions, in particular ICESat-2 and REMA (Reference Elevation Model of Antarctica) /ArcticDEM. The Antarctic Peninsula was selected to develop the methodology and to estimate 15 years of evolution. This is one of the regions where recent estimates of mass loss diverge the most and where glacier dynamics are complex. The elevation change maps reveal, at a high resolution, the spatial pattern of changes over the past 15 years.

*Intervenant

Mitigating co-registration and jitter artifacts for multi-temporal DEM change detection with Pléiades satellite elevation data

Imen Brini * ^{1,2}, Denis Feurer ¹, Riadh Tebourbi ², Fabrice Vinatier ¹,
Riadh Abdelfattah ²

¹ Laboratoire d'étude des Interactions Sol - Agrosystème - Hydrosystème – Institut de Recherche pour le Développement, AgroParisTech, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Institut Agro Montpellier – France

² Ecole supérieure des communications de Tunis – Tunisie

Multi-temporal surface elevation data are obtained from recurrent acquisitions using different sensors and processed with reconstruction methods adapted to each sensor type. A common approach to assess changes is to compute the difference between datasets. With recent advances, optical satellite systems can deliver very high-resolution elevation products with relatively minimal errors.

However, two key issues can strongly affect the reliability of detecting surface changes between multi-temporal datasets. First, accurate co-registration is essential to ensure that pixels from different epochs correspond to the same ground location. Any misalignment introduces spatial mismatches that can be misinterpreted as surface change (Aicardi et al., 2016; Ball et al., 2017). Second, biases related to the satellite acquisition geometry, in particular the variation of the satellite's attitude, known as jitter. These attitude fluctuations propagate into derived products such as Digital Elevation Models (DEM) and DEM of difference (DoD), producing stripe patterns that may obscure the change detection (Nuth & Kääb, 2011).

The particular interest in using Pléiades images to derive DEM arises from the sensor's ability to acquire tri-stereo panchromatic images in one single flight with a high spatial resolution. Several studies have demonstrated the feasibility of generating highly accurate DEMs using Pléiades tri-stereo images (Deschamps-Berger et al., 2020; Beraud et al., 2023; Berthier et al., 2024).

To address these challenges, initially the Time-SIFT approach (Feurer and Vinatier, 2018) was successfully applied on the Pléiades images for 3D reconstruction (Brini et al., 2025a). This approach relies on joining all images from different epochs in the same block, allowing the extraction of multitemporal tie points and is, to the best of our knowledge, the first attempt of what is also called "co-alignment" on push-broom sensors. Multi-temporal tie points and the images' Rational Polynomial Coefficients (RPCs) are refined in a joint bundle adjustment routine, producing co-registered sparse point clouds. Dense clouds are then generated per survey, inherently aligned in a common reference frame, requiring no further co-registration. Notably, no ground control points (GCPs) were used; only image data and RPC served as inputs. To perform change detection, the multitemporal DEM are subtracted to produce a pixel-level change map or DoD.

*Intervenant

Secondly, to mitigate the effect of the jitter observable on the derived DoD, the image noise reduction task is framed as a signal filtering problem, aiming to eliminate repetitive stripe patterns using Fourier transform while preserving relevant topographic information for accurate change detection. The noise frequency is identified through the frequency spectrum using a threshold-based method, allowing the subsequent application of a finite impulse response filter to remove the noise (Brini et al., 2025b).

Experiments conducted on Pléiades DoD (2023-2015) covering the Lebna watershed located in northeastern Tunisia validate the effectiveness of both the Time-SIFT on push-broom sensor and the jitter filtering approaches. The Time-SIFT approach produced co-registered DEM from multi-temporal Pléiades tri-stereo imagery, without GCP or a posteriori co-registration. Furthermore, the Fourier transform-based filtering approach significantly removed the stripes patterns while preserving the relevant information.

Historical Images for Surface Topography Reconstruction Intercomparison eXperiment (Historix)

Amaury Dehecq * ¹, Joaquín Belart ², Friedrich Knuth ³

¹ Institut des Géosciences de l'Environnement – Institut de Recherche pour le Développement,
Université Grenoble Alpes – France

² Icelandic Institute of Nature Research – Islande

³ ETH Zurich – Suisse

Aerial and satellite remote sensing observations are extremely valuable for documenting changes in the Earth surface, and in particular stereoscopic images provide 3D information of these changes. Digital stereoscopic satellite images exist only since the about 2000 preventing an analysis of regional to global changes in the 20th century. Film images, often referred to as historical images, acquired by aerial sensors since the 1930s and since the 1960s by satellite platforms provide a unique opportunity to fill the observational gap, but present specific challenges: complex preprocessing, poorly known camera parameters and position. In the past years, semi or fully automated approaches based on photogrammetric and computer vision methods have emerged, but the performance and limitations of these methods have not yet been evaluated.

The objectives of the Historix project are to 1) foster exchanges between the different groups that process such data 2) compare the different methods to process film-based images 3) mutualize code to process such data.

In this presentation, I will present the benchmark dataset that was selected for the experiment, as well as the preliminary results of the intercomparison. I will provide an overview of the existing groups and methodologies that exist and strategies that have been developed to exploit historical images. Finally, I will present some of the open-source code that exist and are being developed to process historical images.

*Intervenant

Pléiades Glacier Observatory : using Pléiades satellite imagery to estimate glacier mass balance

Anne Guyez * ¹, Etienne Berthier ¹, Jérôme Lebreton ¹

¹ Laboratoire d'études en Géophysique et océanographie spatiales – Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National d'Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique – France

Glaciers are highly sensitive indicators of climate changes. Their mass balance is an essential variable to describe their health and measure their relative contribution on river runoff and sea level rise. Here, we present our efforts to compute mass balance from the Pleiades Glacier Observatory (PGO) stereo pairs, covering 140 sites spread all over the globe and covering in total 20 000 km² of glaciers (*Berthier et al. 2024*). The acquisition campaigns started in 2016 for the Northern Hemisphere and 2017 for the Southern Hemisphere and each site is revisited five years (cloud permitting) after the first acquisition. Once repeat digital elevation models (DEMs) are available, we generate elevation difference maps. The processing workflow is based on several steps including stable terrain analysis to correct along and across track bias, filtering outliers and hypsometric interpolation. One of the innovative aspects of the processing is the calculation of uncertainties in elevation change using xDEM spatial statistics integrated tools to account for spatial correlation of random errors (*Hugonnet et al. 2022*). The validity of this estimates was confirmed by null test results (change maps with 0 days difference). We successfully applied the workflow on our revisited sites and now have 91 PGO sites with elevation change data at 2 m resolution which correspond to 5700 glaciers. These estimations are now being added to the WGMS (world glacier monitoring service) database so that anyone will be able to access the data.

References:

Berthier, E., Lebreton, J., Fontannaz, D., Hosford, S., Belart, J. M. C., Brun, F., ... & Blondel, C. (2024). The Pléiades Glacier Observatory: high-resolution digital elevation models and ortho-imagery to monitor glacier change. The Cryosphere, 18(12), 5551-5571.

Hugonnet, R., Brun, F., Berthier, E., Dehecq, A., Mannerfelt, E. S., Eckert, N., & Farinotti, D. (2022). Uncertainty analysis of digital elevation models by spatial inference from stable terrain. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 15, 6456-6472.

*Intervenant

La mission CO3D, cartographier la Terre en 3D

Laurent Lebegue * ¹

¹ Centre National d'études Spatiales [Toulouse] – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – France

La mission CO3D, dédiée à une cartographie en 3D des terres émergées mondiales avec une précision métrique, a été lancée avec succès le 25 juillet. Les opérations d'étalonnage de la constellation des 4 satellites sont en cours mais le potentiel de ces nouvelles données est déjà très prometteur. Nous verrons dans la présentation les capacités offertes par cette nouvelle génération de satellites ainsi que les premiers résultats obtenus sur différents cas d'usage.

*Intervenant

Earth-surface dynamics with satellite DEM time series: cross-scale insights and CO3D/4D-Earth perspective

Antoine Lucas *¹, Eric Gayer², Laurent Michon³, Anne Mangeney⁴,
Kristian Svennevig⁵, Jiahui Kang⁶, Fabian Walter⁶, Yassine Boukhari⁴,
Matthieu Gougeon⁷, Stéphane Jacquemoud⁸

¹ Institut de Physique du Globe de Paris – Institut National des Sciences de l’Univers, IPG PARIS,
Université de la Réunion, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7154, Université de Paris
: UMR7154 – France

² IPGP / Université Paris Cité / CNRS – Université Paris Cité, Institut de physique du globe de Paris,
CNRS, IGN, F-75005 Paris, France, Université Paris Cité – France

³ Université Clermont-Auvergne – Université Clermont Auvergne, CNRS – France

⁴ IPGP / Université Paris Cité / CNRS – Université Paris Cité – France

⁵ Geological Survey of Denmark and Greenland, – Danemark

⁶ WSL - Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research – Suisse

⁷ GeoAzure – Université Nice Sophia Antipolis – France

⁸ IPGP / Université Paris Cité / CNRS – Université Paris Cité – France

Quantifying how landscapes deform, erode, and transfer sediment requires 3D time series that resolve both steady trends and event-driven pulses. In this contribution, I synthesize results from contrasting environments; temperate badlands, a tropical slow-moving landslide, a volcanic canyon, and a polar fjord; and outline how forthcoming CO3D stereo constellations will expand these capabilities. Across all cases, dense multi-epoch DEMs (from satellite/aerial photogrammetry and LiDAR) and to some extent, InSAR time series, rigorously co-registered with uncertainty metrics, reveal three robust patterns: (i) erosion and deformation are strongly spatially localized ("hotspots"); (ii) fluxes are temporally intermittent, concentrated in short windows tied to extreme precipitation or rapid forcing; and (iii) surface change is predictably coupled to hydro-mechanical drivers, enabling constraint of physics-based models.

In badlands (Draix-Bléone, French Alps), diachronic airborne/UAV LiDAR combined with catchment sediment budgets shows that failures on ridges and small landslides affect a tiny fraction of area yet contribute disproportionately to exported mass. DoDEM analytics map where and when erosion exceeds mean hillslope denudation, providing a basis for targeted monitoring and for evaluating sediment pathways across critical-zone compartments.

For the Grand Eboulis landslide (Réunion Island), Sentinel-1 InSAR time series and optical archives jointly capture a continuous, seasonally modulated displacement field punctuated by accelerations after exceptionally wet periods and shallow failures during cyclone impact. The merged 3D view distinguishes baseline creep from event-triggered responses, a prerequisite for early-warning metrics.

*Intervenant

Along the Rivière des Remparts, multi-decadal photogrammetric DEMs document canyon-floor reworking and rapid downstream conveyance of landslide debris. Sediment export is shown to occur during a small number of high-percentile rainfall days, confirming that long-term landscape change is dominated by rare, intense events rather than by mean climate.

In a polar fjord (East Greenland), rapid topographic change from a rock-ice avalanche triggered a tsunami that evolved into a long-lived seiche, producing a monochromatic very-long-period seismic signal detectable worldwide. Coupling 3D geometry with simple force-equivalent models links hydrodynamic oscillations to seismic radiation, illustrating cascading hazards across the cryosphere–hydrosphere–lithosphere system. A historical analogue; the 1965 Mahavel rock avalanche (Réunion); revisited with photogrammetry and shallow-water modeling further shows that event dynamics and rheology can be constrained *ex post facto* when high-quality 3D reconstructions exist.

Systematic, inter-calibrated satellite stereo DEM time series (Pléiades/NEO today; CO3D imminently) will generalize these insights to larger regions with higher cadence. We emphasize practical protocols; robust co-registration, change detection tolerant to outliers, propagation of elevation uncertainty, and joint exploitation with InSAR/optical/survey data; to (1) close mass balances from slope to channel, (2) detect thresholds and hysteresis in seasonally forced systems, (3) benchmark physically based models (e.g., frictional shallow-water), and (4) prioritize operational monitoring of hotspots under a changing climate. This federated view argues that 3D from space, used as a time-resolved measurement system, is now mature for both fundamental geomorphology and risk-informed decision making.

Positionnement GNSS

Architecture et fonctionnalités d'une base de données de métadonnées multi-sources et interopérable pour le traitement et l'analyse de séries temporelles GNSS

Julien Barnéoud ^{*}, Olivier Bock ^{*}

1

¹ Institut de Physique du Globe de Paris – Université Paris Cité : UMR7154, IGN, Université Paris Cité – France

Ce projet vise à développer une **base de données dédiée au moissonnage, au croisement et à la validation de métadonnées de stations GNSS** (sitelogs), conçue pour répondre aux besoins de la communauté en géodésie et géophysique française. L'objectif est de **centraliser, standardiser et diffuser** des métadonnées des stations (localisation, type d'antenne et radome) issues de sources hétérogènes (réseaux nationaux, internationaux, observatoires) selon des principes FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable). Ces informations sont critiques pour le traitement précis des données GNSS et l'analyse de séries temporelles de position et de retards troposphériques.

L'architecture repose sur :

Un module de moissonnage automatique : collecte des fichiers sitelogs et RINEX depuis des dépôts publics (IGS, M3G, RENAG, RGP, etc.) et des sources locales (SWEPOS, GSI), avec un contrôle de cohérence (format, redondances, mise à jour).

Un système de croisement et de validation : calcul d'une position de approchée et création d'un code ISO pays pour chaque station ; détection des incohérences (dates, coordonnées, changements de matériel) et résolution semi-automatisée via des règles métiers et une interface de curation.

Un moteur de requêtes utilisateur : génération dynamique de **tables d'association** pour des listes de stations personnalisées, incluant les métadonnées essentielles (localisation, type d'antenne et récepteur).

Un outil d'export : production de fichiers structurés (CSV, JSON, SQL) ou d'API pour une intégration directe dans les chaînes de traitement (ex. : logiciels GINS, GipsyX, GAMIT, Bernese,

^{*}Intervenant

ou scripts Python/R).

Fonctionnalités clés :

- **Interopérabilité** : compatibilité avec les standards IGS et RINEX, et connexion prévue aux bases existantes (FormaTerre, GeodesyPlotter).
- **Traçabilité** : historique des modifications et score de confiance pour chaque métadonnée.
- **Extensibilité** : ajout de nouvelles sources et de nouveaux formats d'import et d'export.

Cas d'usage : (Re-)traitement de données GNSS, validation de détection de sauts liés aux changements d'équipement dans l'analyse de séries temporelles GNSS (position, retards troposphériques).

Une première version de cette infrastructure qui compte près de 15.000 stations uniques, moissonnées sur plus d'une vingtaine de sources (IGS, M3G, etc.) a été testée à l'IPGP. Elle devrait être adoptée par l'ensemble des centres d'analyse SPOTGINS. Une démonstration sera proposée lors de la conférence.

Le but de notre présentation est d'évaluer les besoins de la communauté pour une **intégration dans d'autres workflows (RENAG, EPOS)** et la possibilité, in fine, de sa **distribution et maintenance par FormaTerre**.

Évaluation des données GNSS du réseau collaboratif CentipedeRTK pour les géosciences

Pierre Bosser * ¹, Julien Ancelin ², Marianne Metois ³, Lucie Rolland ⁴,
Maurin Vidal ⁴

¹ École Nationale Supérieure de Techniques Avancées, Lab-STICC – Institut Polytechnique de Paris – France

² INRAe DSLP - Domaine expérimental de Saint-Laurent-de-la-Prée – INRAE – France

³ Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes, Environnement – Ecole Normale Supérieure de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Institut National des Sciences de l'Univers, Université Jean Monnet - Saint-Etienne, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁴ Géoazur – Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire de la Côte d'Azur, Université Côte d'Azur, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Recherche pour le Développement – France

Développé depuis 2019, le réseau CentipedeRTK est un réseau GNSS collaboratif permanent dont l'objectif principal est de rendre le positionnement RTK librement accessible, principalement à l'aide de récepteurs et d'antennes à bas coût. Depuis sa création, le réseau s'est considérablement développé, bien au-delà des frontières de la France, et compte aujourd'hui près de 1200 stations de base pour 2000 à 5000 utilisateurs journaliers. Le principal secteur d'utilisation est l'agriculture, mais de plus en plus d'organismes publics et privés ainsi que des particuliers y ont recours. La communauté des géosciences s'est rapidement intéressée au réseau, d'abord comme utilisatrice de ces bases RTK (suivi du niveau de la mer, relevés par drone, etc.), puis pour le post-traitement des mesures brutes issues de ces bases. Ainsi, les données des stations permanentes du réseau CentipedeRTK sont archivées quotidiennement en temps différé depuis la mi-2022 par le centre de données du service national d'observation Rénag, dans le but de les exploiter pour des applications en géosciences.

Nous présentons ici les résultats de deux études récentes menées à partir des données acquises en 2023 par un sous-réseau de plus de 250 stations CentipedeRTK localisées en France métropolitaine. Les observations ont été analysées en mode PPP à l'aide du logiciel GipsyX. Les positions ainsi déterminées ont été évaluées par comparaison avec celles issues de stations de qualité géodésique appartenant à des réseaux conventionnels (RGP, RENAG, Orphéon). L'analyse des séries temporelles montre une bonne qualité globale, malgré une légère dégradation des répétabilité, particulièrement marquée sur la composante verticale. Les retards troposphériques estimés pour ce sous-réseau ont été comparés à ceux obtenus à partir des stations conventionnelles. Le niveau d'accord est très satisfaisant, bien qu'un biais subsiste, vraisemblablement lié aux limites des antennes low-cost (sensibilité au trajet multiple, absence de calibration précise).

Ces résultats soulignent la nécessité de mieux caractériser et corriger les défauts liés aux an-

*Intervenant

tennes low-cost, mais aussi d'informer et d'accompagner la communauté CentipedeRTK dans l'adoption de bonnes pratiques d'installation des stations (documentation, recommandations techniques, etc.). Nous montrons ici que des réseaux low-cost développés pour du positionnement temps réel peuvent être efficacement utilisés à des fins de recherche en sciences de la Terre, ce qui change la donne pour les études troposphériques et de la déformation du sol.

GNSS satellite hardware biases stability over time: analysis of the products from several analysis centers

Clément Gazzino * ¹, Flavien Mercier ²

¹ CNES – Centre National d’Etudes Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France

² CNES/GRGS – CNES, GRG – 18 avenue edouard belin 31400 Toulouse, France

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are widely used for absolute positioning on Earth, and in particular for precise point positioning and geodetic fundamental studies. For these applications, millimeter level accuracy is required. In order to achieve this performance, all the errors affecting the measures from the GNSS satellites have to be taken into account. They are of three kinds: at the GNSS satellites level, in the propagation channel, and at the receiver level. For the part related to the emitting satellites, even if precise satellite orbits and clocks estimates are retrieved from analysis centers, hardware biases still affect the measure. They occur from imperfections and delays between signals that should have been ideally emitted simultaneously. Besides this, these biases are frequency and modulation dependent, so that they cannot be removed with simple signal combinations. Their estimation is thus crucial for carrier phase ambiguity resolution and consequently for precise positioning. Various analysis centers compute those biases, with various techniques, in undifferenced or differenced format. The proposed presentation aims at comparing the GNSS satellite biases estimated by the analysis centers. Since the delays come from hardware imperfections, they are expected to be nearly constant over time for each satellite independently. The presentation will verify this assumption on the several analyzed products and determine the variability of the products.

*Intervenant

Champ de vitesses GNSS à la côte à partir de produits SPOTGINS: résultats, évaluation, application

Médéric Gravelle * ¹, Adrien Laval , Mikaël Guichard , Guy Woppelmann

¹ Littoral ENvironnement et Sociétés [La Rochelle] – CNRS : UMR7266, Université de La Rochelle – France

Depuis plus de 20 ans, le centre d'analyse ULR produit des champs de vitesse GNSS à la côte afin d'estimer la contribution des mouvements verticaux dans les observations du niveau de la mer par les marégraphes. Ces solutions successives ont jusque-là été réalisées grâce au logiciel GAMIT/GLOBK qui est basé sur une approche en doubles différences. La dernière solution produite (ULR7), publiée en 2023, a contribué à la campagne de réanalyses du Service International du GNSS (IGS), repro3, et fournit des estimations de vitesses verticales pour 461 stations GNSS proches de marégraphes.

Le centre d'analyses ULR s'appuie sur SONEL, centre de données GNSS du programme mondial d'observation du niveau de la mer (GLOSS). Aujourd'hui, SONEL distribue les observations de 1340 stations GNSS permanentes côtières, proches de marégraphes et/ou capables de mesurer le niveau de la mer par réflectométrie GNSS. Le temps de calcul considérable de la stratégie jusque-là adoptée par le centre d'analyses ULR et l'approche en réseau de stations qui en découle ne permet plus aujourd'hui de répondre convenablement aux besoins des utilisateurs (estimations de mouvements verticaux sur tous les sites considérés par SONEL, séries temporelles mises à jour régulièrement...). C'est la raison pour laquelle une approche PPP (Precise Point Positioning) a été explorée à travers le projet collaboratif SPOTGINS qui s'appuie sur le logiciel GINS développé au CNES.

Nous montrons ici les résultats du nouveau champ de vitesses de plus de 1200 stations GNSS côtières dont les séries temporelles ont été calculées dans le cadre de SPOTGINS et dont l'analyse des séries résultantes a été réalisée grâce à la librairie PyTRF. Nous présentons des éléments de comparaison avec des solutions d'autres groupes ainsi qu'une application à une étude de cohérence régionale du niveau de la mer.

*Intervenant

Produits GNSS du centre d'analyse IGS CNES/CLS pour les applications géodésiques et géophysiques

Georgia Katsigianni * ¹, Adrian Banos Garcia ¹, Sylvain Loyer ¹, Adrien Mezerette ¹, Ali Naouri ², Alvaro Santamaria ³, Eleonore Saquet ¹

¹ Collecte Localisation Satellites - - - France

² CELAD - - - France

³ CNES - - - France

Le Centre d'analyse IGS CNES/CLS assure le calcul et la diffusion de produits GNSS, destinés aux applications précises de la communauté scientifique en géodésie et en géophysique. Cette présentation propose une revue des produits actuellement disponibles, en retraçant les développements historiques et en insistant sur les évolutions récentes et les développements en cours ou à venir. Nous illustrerons les possibilités offertes aujourd'hui par les diverses applications actuelles de ces produits (positionnement/orbitographie/temps fréquence).

L'accent sera mis en particulier sur les nouveaux produits rapides, ultra-rapides, ainsi que sur les produits délivrés pour le Multi-GNSS Pilot Project de l'IGS (MGEX), qui intègrent désormais la constellation BeiDou. Nous présenterons également les améliorations apportées aux modèles d'attitude des satellites, ainsi que le développement des produits ionosphériques, dont la publication est prévue prochainement.

*Intervenant

Monitoring the Earth's deformation with the SPOTGINS series

Alvaro Santamaría-Gómez ^{*} ¹, Médéric Gravelle ^{*}

², Jean-Paul Boy ³, Sylvain Loyer ⁴, Samuel Nahmani ⁵, Joëlle Nicolas ⁶,
José Luis García Pallero ⁷, Pollet Arnaud ⁸, Pierre Sakic ⁹, Guy
Woppelmann ¹⁰, Olivier Bock ⁵

¹ Géosciences Environnement Toulouse – Centre National d'Études Spatiales [Toulouse] – France

² Littoral ENvironnement et Sociétés [La Rochelle] – CNRS : UMR7266, Université de La Rochelle – France

³ Institut Terre Environnement Strasbourg – université de Strasbourg – France

⁴ Collecte Localisation Satellites – – – France

⁵ Institut de Physique du Globe de Paris – Université Paris Cité : UMR7154, IGN, Université Paris Cité – France

⁶ Laboratoire Géomatique et foncier – Conservatoire National des Arts et Métiers [CNAM] : EA4630, Conservatoire National des Arts et Métiers [CNAM] : EA4630 – France

⁷ ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid – Espagne

⁸ Institut de Physique du Globe de Paris – Université Paris Cité : UMR7154, IGN, Université Paris Cité – France

⁹ Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) – Institut National des Sciences de l'Univers, IPG PARIS, Université de la Réunion, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7154, Université Paris Cité : UMR7154, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Paris Cité – France

¹⁰ Littoral ENvironnement et Sociétés [La Rochelle] (LIENSs) – CNRS : UMR7266, Université de La Rochelle – Bâtiment Marie Curie Avenue Michel Crépeau 17 042 La Rochelle cx1 - Bâtiment ILE 2, rue Olympe de Gouges 17 000 La Rochelle, France

A distributed Global Navigation Satellite System analysis center, designated SPOTGINS, has been established by several research groups that utilize the GINS software and the GRG precise products computed by the CNES/CLS analysis center for the IGS. Despite the heterogeneity in the research objectives, the SPOTGINS members apply the same configuration and metadata. The computed global ambiguity-fixed precise point positioning time series are fully consistent among the members, and are subsequently published as a single product on The Geodesy Plotter of the Solid Earth Center portal (ForM@Ter). At this moment, the SPOTGINS dataset includes 5768 daily series from May 2000 to present that include GPS and Galileo observations. This product facilitates a range of research activities, including but not limited to the precise monitoring of the Earth's deformation. A comparison of the SPOTGINS series with published series from the Nevada Geodetic Laboratory solution shows no significant difference in quality.

*Intervenant

Niveau de la mer / Climat

Characterizing the tropical cyclone dynamics from Earth observation data synergy

Avenas Arthur * ¹, Alexis Mouche ², Chapron Bertrand ², John Knaff ³,
Pierre Tandeo ⁴, Paul Platzer ⁵

¹ Agence Spatiale Européenne – European Space Research Centre, Frascati 00044 RM, Italy – France

² Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) – Institut Français de
Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) – 1625 Rte de Sainte-Anne, 29280 Plouzané,
France

³ NOAA – États-Unis

⁴ IMT Atlantique, Lab-STICC, UMR CNRS 6285, 29238, Brest, France – Lab-STICC UMR CNRS
6285, Brest – France

⁵ Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER – Institut Français de Recherche pour
l'Exploitation de la MER - IFREMER, Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
(IFREMER) – France

Satellites have been used to analyse and monitor Tropical Cyclones (TCs) since the 1960s. Probing the ocean surface during TC conditions, combined measurements from active scatterometers and passive radiometers are essential. Yet, for various reasons (low/medium spatial resolution, loss of signal sensitivity at high winds, rain contamination), the strong gradients of the surface winds that can occur at scales of a few kilometers are badly resolved by these sensors.

More recently, retrieval methods to estimate ocean surface wind speeds in intense TCs have been demonstrated for spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) observations. By combining the C-band co- and cross-polarized channels, SAR estimates of TCs ocean surface wind speeds can be performed at a high spatial resolution (~ 1 km). Such data provides unique and precious information on TCs boundary-layer processes, especially within inner-core regions of strong surface wind gradients. Today the spatio-temporal sampling of these sensors is reasonably good, with ESA's Sentinel-1A and -B wide-swath acquisitions being complemented by different Canadian SAR missions.

Existing theories for TCs steady-state and/or dynamical life cycle may thus be re-examined with respect to these unprecedented observations. An extended SAR TC database was used to corroborate that fundamental conservation principles constrain TCs radial wind structure. Controlling the radial wind decay, two characteristic radii were exhibited and shown to be critical for TCs life cycle. Based on these radii, analytical solutions for 1) TCs steady-state wind structure and 2) TCs wind structure short-term (~ 12 hrs) evolution were then derived and demonstrated to be fully consistent with SAR observations.

*Intervenant

Implications on how SAR observations may complement global and historical TCs vitals to refine the detection of TCs climate trends are discussed. Furthermore, possible improvements of the theory using other data sources (e.g geostationary visible/infrared sensors and passive microwave sounders) and future missions (e.g Metop Next-Generation, CIMR, ROSE-L, S1NG and Harmony) are addressed.

Oscillations annuelles et interannuelles des variations de masse de la calotte groenlandaise avec GRACE(-FO), liées aux indices climatiques

Florent Cambier *¹, José Darrozes¹, Muriel Llubes¹, Lucía Seoane¹,
Guillaume Ramillien¹

¹ GET, Observatoire Midi-Pyrénées, Université de Toulouse, CNRS, IRD, CNES – GET, Observatoire Midi-Pyrénées, Université de Toulouse, CNRS, IRD, CNES – France

Le réchauffement climatique en cours menace la calotte glaciaire du Groenland (GIS) qui présente une perte de masse depuis 1990. Cette perte varie annuellement et interannuellement, reflétant les interactions complexes entre la calotte glaciaire et les circulations atmosphérique et océanique. Nous étudions les variations du bilan de masse de la GIS d'avril 2002 à décembre 2023 à l'aide des données de la mission gravimétrique GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) et de ses missions de suivi (GRACE-FO). Les anomalies de masse mensuelles de la solution COST-G sont comparées aux indices climatiques cumulatifs (Oscillation Nord-Atlantique - NAO, Indice de Blocage du Groenland - GBI, Oscillation Multidécennale Atlantique - AMO) et aux paramètres météorologiques (température, précipitations, albédo de surface). L'analyse des fonctions orthogonales empiriques révèle cinq principaux modes de variation, le premier capturant les fréquences annuelles et interannuelles (4 à 11 ans), tandis que les modes suivants ne décrivent que les fréquences interannuelles. L'analyse par ondelettes montre des corrélations annuelles significatives entre les variations de masse du GIS et la température ($r = -0,88$), la NAO ($r = 0,74$) et le GBI ($r = -0,85$). Un cycle annuel complet a été observé, basé sur les corrélations entre les variations de la masse de glace, les trois indices climatiques et les paramètres météorologiques. Les oscillations interannuelles sont également observées avec des périodicités allant de 4 à 7 ans qui pourraient être liées aux effets de la rotation de la Terre solide et des oscillations atmosphériques. Une deuxième fréquence interannuelle importante est observée à 11 ans et semble correspondre au cycle solaire.

*Intervenant

Evaluation et connexion de systèmes altimétriques par nivellement hydrodynamique

Jonathan Chenal * ¹, Sylvain Lavoué ¹, Olivier Jamet ¹

¹ Institut National de l'Information Géographique et Forestière [IGN] – IGN – France

L'altitude zéro du système altimétrique légal de la France continentale NGF-IGN69 a été déterminé par l'observation du niveau de la mer au marégraphe de Marseille entre 1885 et 1897, et propagée sur le territoire par nivellement géométrique et la détermination des altitudes des repères de nivellement. Or, d'une part, le système IGN69 est suspecté depuis plusieurs décennies d'une pente nord-sud d'une vingtaine de centimètres et, d'autre part, le niveau moyen de la mer n'est pas une surface d'altitude constante. La disponibilité de produits de topographie dynamique de l'océan (la différence entre le niveau moyen de la mer et la surface de niveau formée par un géoïde de référence) rend possible le développement du nivellement hydrodynamique, c'est-à-dire de revisiter la dénivelée entre les marégraphes français et la connexion des systèmes altimétriques de territoires séparés par la mer. Dans cette étude, nous estimons la dénivelée entre Dunkerque et Marseille, à 4,920 m contre 5,150 m dans le système IGN69. Nous suggérons par ailleurs que la traverse de nivellement de référence (NIREF) entre Marseille et Dunkerque de 1983 est cohérente (4,895 m) avec celle obtenue par nivellement hydrodynamique, tandis que la traverse récente, réalisée sur la période 2013-2016, est possiblement frappée d'une erreur (4,988 m). Enfin, nous démontrons la capacité du nivellement hydrodynamique à estimer la pente méridienne du système IGN69, à environ 3,6 cm/deg, le biais entre les origines des systèmes continental IGN69 et corse IGN78, à à environ 14,5 cm, puis à évaluer les mêmes paramètres pour le système britannique ODN avec une pente de méridienne de 3,1 cm/deg, et un biais de son origine avec celle de l'IGN69 de 13,5 cm. Plus largement, le nivellement hydrodynamique ouvre des perspectives pour l'unification des références verticales, à la fois pour les archipels ou à l'échelle internationale, et pour la mise en cohérence des référentiels verticaux terrestre et marin nécessaire notamment pour l'adaptation des littoraux à l'élévation du niveau de la mer.

*Intervenant

Estimating the earth energy imbalance with geodetic data to assess global and regional Earth energy budget

Ramiro Ferrari * ¹, Robin Fraudeau ¹, Sebastien Fourest ², Benoit Meyssignac ², Alejandro Blazquez ², Michaël Ablain ¹, Julia Pfeffer ¹, Alexandre Boughanemi ¹, Eric Pellereau ¹

¹ Magellium – Magellium, Ramonville Saint-Agne, France – France

² CNES – Centre National d’Etudes Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France

The ocean is the first reservoir to store the energy accumulated by the Earth from greenhouse gas emissions since the start of the industrial era, in the form of heat (~91%). An accurate estimation of the change in ocean heat content (OHC) is therefore crucial for understanding Earth’s energy imbalance (EEI) and monitoring climate change (Meyssignac et al., 2019).

Over the past two decades (2002–2022), the combination of satellite gravimetry with altimetry and in situ data has allowed us to monitor the change in the ocean heat content (OHC). Our approach leverages the complementarity of different observation systems. Space geodetic data provide continuous, global coverage with well-characterized uncertainties, while in situ measurements deliver detailed vertical profiles of ocean temperature and salinity. From the global OHC estimate, the Earth’s energy imbalance (EEI: +0.9 W/m²) was derived with high accuracy (± 0.1 W/m² within a 90% confidence interval) over decadal and longer timescales. Over 1993–2022, geodetic Global OHC (GOHC) showed a significant positive trend of 0.75 W·m² (0.61, 1.04). For 2005–2019, in-situ estimates ranged from 0.55 to 0.7 W·m², while the geodetic product reached 0.9 W·m². Comparisons with CERES indicated consistent EEI trends of about 0.50 ± 0.47 W·m² per decade.

As part of the development of the new operational service for gravimetric solutions at CNES, upcoming versions of the MOHeaCAN product will incorporate improved gravimetric datasets to reduce the uncertainty of OHC and EEI estimates particularly at interannual time scales. We also illustrate how this approach can be applied to assess the performance of future gravimetry missions (NGGM, MAGIC), with the objective of quantifying their added scientific value for constraining the global energy cycle-particularly in meeting the requirements identified by Meyssignac et al. (2023), which call for uncertainties below 0.1 W·m² per decade.

*Intervenant

Observations actuelles et prochains défis pour le calcul d'orbite des missions altimétriques

John Moyard * ¹, Flavien Mercier *

², Alexandre Couhert *

¹, Suzanne Blondel *

¹, Sabine Houry *

¹, Clément Gazzino *

1

¹ CNES – Centre National d'Etudes Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France

² CNES – Centre National d'Etudes Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France

Depuis le début de la mission TOPEX/Poseidon en 1992, l'équipe de détermination d'orbites précises (POD) du CNES a été confrontée avec ses partenaires NASA (GSFC, JPL) historiques à des objectifs de performances de missions altimétriques de plus en plus exigeantes. Concernant le budget d'erreurs régionales de la mesure du niveau moyen des océans, la composante orbitale reste un contributeur majeur. Aujourd'hui, les solutions d'orbites scientifiques DORIS+GNSS calculées pour les missions Copernicus en vol (Sentinel-3A/B et Sentinel-6 MF) atteignent des performances radiales autour de 5 mm RMS, telles que validées par des observations indépendantes SLR. La future mission altimétrique Sentinel-6 Next Generation (NG) affiche des attentes de stabilités régionales d'orbites de l'ordre du millimètre sur 10 ans à l'échelle d'un bassin océanique de la taille de la France. Un tel objectif est nécessaire pour pouvoir identifier des variations du niveau moyen des mers sur quelques années avec des résolutions spatiales de plus en plus fines (1000 km x 1000 km), dans le but de pouvoir caractériser les signatures anthropiques de cette élévation globale et de remonter à la mesure du bilan radiatif de la Terre afin de suivre au plus près l'état du réchauffement climatique de la planète. L'objectif de cette présentation est de partager des résultats sur des analyses en cours de solutions d'orbites altimétriques qui illustrent les défis de l'équipe POD CNES.

*Intervenant

Impact des futures missions de gravimétrie spatiale sur la fermeture du bilan de la mer

Julia Pfeffer * ¹, Marie Bouih ², Benoit Meyssignac ³, Robin Fraudeau ⁴,
Alejandro Blazquez , Roland Pail , Schlaak Marius , Ilias Daras

¹ Magellium – Consultant indépendant – France

² Magellium – CNES, Magellium, Ramonville Saint-Agne, France – France

³ LEGOS – LEGOS, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS – France

⁴ Magellium – Magellium – France

Pour évaluer notre compréhension des changements du niveau de la mer, il est essentiel d'en établir le bilan. Cet exercice repose sur des estimations précises et fiables des variations du niveau de la mer mesurées par altimétrie, ainsi que de ses composantes stériques et de masse, observées respectivement par des capteurs in situ et par gravimétrie satellitaire. Les futures missions de gravimétrie spatiale comme GRACE-C (paire polaire simple), NGGM (paire inclinée simple) et MAGIC (double paire) offrent des perspectives prometteuses pour améliorer la clôture du bilan du niveau de la mer à différentes échelles spatiales et temporelles.

Dans le cadre du projet SING, les erreurs attendues pour chaque mission ont été estimées et comparées aux capacités actuelles de clôture du bilan de la mer. À l'échelle globale, les missions NGGM et MAGIC présentent des erreurs nettement plus faibles que GRACE-C, ce qui laisse envisager une clôture du bilan de la mer sans recours systématique au filtrage. À l'échelle régionale, la paire inclinée de NGGM permet une réduction notable des erreurs dans les zones de transport océanique aux latitudes moyennes (60°S–60°N). GRACE-C assure pour sa part la continuité des séries temporelles existantes et la couverture des régions polaires. Quant à MAGIC, elle combine les avantages de NGGM et de GRACE-C, en termes de précision, de résolution, de couverture et de continuité.

La comparaison des erreurs simulées pour GRACE-C aux incertitudes estimées à partir des missions GRACE et GRACE-FO montre une bonne cohérence pour la variabilité à court terme. En revanche, des écarts apparaissent sur les échelles plus longues, ce qui pourrait refléter certaines limites liées aux modèles de référence utilisés pour les simulations. Ces écarts pourraient également être liés aux différences inhérentes entre les estimations d'erreurs simulées (dans un cadre où la référence est connue) et les incertitudes estimées en conditions réelles (basées sur des approches d'ensemble). Ces constats soulignent l'importance de poursuivre les travaux méthodologiques pour mieux caractériser les incertitudes des missions actuelles et renforcer la robustesse des simulations effectuées pour quantifier l'impact de nouvelles missions de gravimétrie spatiale.

*Intervenant

FILTRAGE DE KALMAN ÉTENDU APPLIQUÉ À L'OBSERVATION HAUTE FRÉQUENCE DU NIVEAU DE LA MER PAR INTERFÉROMÉTRIE GNSS

Aurélien Pira * ¹, Alvaro Santamaría-Gómez *

², Guy Woppelmann ¹

¹ Littoral ENvironnement et Sociétés – Institut National des Sciences de l'Univers, La Rochelle
Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Géosciences Environnement Toulouse – Institut de Recherche pour le Développement, Université
Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National d'Études
Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique – France

La demande croissante pour un suivi précis et à haute fréquence du niveau de la mer a favorisé le développement de techniques de mesure alternatives, parmi lesquelles l'interférométrie GNSS par réflectométrie (GNSS-IR) apparaît comme une approche prometteuse. Les méthodes GNSS-IR reposent généralement sur l'exploitation du rapport signal/bruit (SNR), le plus souvent à l'aide d'analyses spectrales telles que les périodogrammes de Lomb-Scargle, permettant d'atteindre une précision centimétrique dans la mesure du niveau moyen de la mer (Larson et al., 2013). Ces approches présentent toutefois deux limites majeures : elles exigent de longues séries temporelles, ce qui restreint leur capacité à caractériser les variations rapides du niveau marin, et elles produisent des séries temporelles irrégulièrement échantillonnées. Des travaux récents ont montré que l'utilisation de filtres de Kalman pouvait améliorer simultanément la précision et la résolution temporelle (Santamaría-Gómez et Watson, 2017; Strandberg, Hobiger et Haas, 2019; Liu et al., 2023), ouvrant ainsi la voie à de nouvelles avancées méthodologiques. Dans ce contexte, nous présentons un algorithme original pour les mesures GNSS-IR du niveau marin, basé sur un filtre de Kalman étendu (EKF). Il permet notamment d'estimer en continu une hauteur de réflexion commune à l'ensemble des observations SNR, et d'obtenir des fréquences d'échantillonnage équivalentes à celles des observations GNSS brutes. Pour assurer la robustesse du suivi dans des environnements dynamiques et réduire les risques de perte de signal, l'algorithme exploite des observations multi-constellations, intègre un modèle de marée, et applique une correction du décalage du centre de phase des antennes GNSS (PCO). Cette combinaison apporte une forte redondance de l'information, améliorant ainsi la continuité et la précision des séries temporelles. La méthode a été évaluée sur trois sites côtiers présentant des contextes hydrodynamiques contrastés : Brest (France), Sète (France) et Cedar Key (États-Unis). Pour chacun d'eux, au moins une année de données a été analysée avec une fréquence d'échantillonnage de 20 à 30 secondes. Les résultats montrent une différence quadratique moyenne (RMSD) d'environ 2,5 cm par rapport à des marégraphes co-localisés. À Cedar Key, l'algorithme a également permis de restituer

*Intervenant

une baisse du niveau marin de 70 cm induite par le passage de l'ouragan Milton en 2024, avec une RMSD de 2,0 cm, attestant de sa capacité à saisir finement des variations rapides dans des conditions extrêmes. Grâce à sa précision, sa flexibilité temporelle et sa conception adaptée au temps réel, cette approche constitue une solution économique et évolutive, particulièrement adaptée pour renforcer les réseaux marégraphiques et combler les lacunes géographiques où les techniques traditionnelles sont mises en difficultés.

Projet HYDROFAST : étude des phénomènes transitoires en Polynésie Française par réflectométrie GNSS

Guillaume Ramillien * ¹, Jose Darrozes *

², Lucia Seoane ², Valérie Clouard ², Marania Hopuare ³, Keitapu Maamaatuaiahutapu ³, Bastien Plazolles ², Laurent Roblou ⁴, Yann Krien ⁵

¹ Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Institut de Recherche pour le Développement, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5563 – Observatoire Midi-Pyrénées 14 Avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France

² Géosciences Environnement Toulouse – Institut de Recherche pour le Développement, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5563, Centre National de la Recherche Scientifique – France

³ Université de la Polynésie Française – Polynésie française

⁴ Laboratoire d'aérodynamique – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁵ Laboratoire d'études en Géophysique et océanographie spatiales – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National d'Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique – France

La réflectométrie GNSS (GNSS-R) est une technique opportuniste qui utilise la réflexion des signaux électromagnétiques des constellations GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, etc.) à la surface de l'eau afin de déterminer les variations de hauteur de la surface océanique au cours du temps autour de l'antenne réceptrice. Dans les zones côtières, les séries temporelles GNSS-R, d'une précision centimétrique, permettent de décrire les ondulations régulières liées aux harmoniques de marée, les effets météorologiques (comme ceux de la pression atmosphérique selon le principe du baromètre inverse) et d'autres phénomènes transitoires plus rapides. Dans les zones côtières, ces séries temporelles permettent de décrire les harmoniques de marées, les effets météorologiques (comme ceux de la pression atmosphérique) et d'autres phénomènes transitoires plus rapides, tels que les tsunamis, vagues de tempêtes, ondes infragravitaires, etc. Le projet HYDROFAST, mené en collaboration avec l'université de Polynésie française, vise à enregistrer et étudier les événements de surface liés à l'activité volcanique sous-marine dans la zone Pacifique, notamment les phénomènes inhabituels de surcote, comme celui causé par l'explosion du volcan aux îles Tonga en janvier 2022. Il est également possible de caractériser la dynamique courants côtiers (vitesse, direction) à l'aide de la réflectométrie GNSS en utilisant les données doppler. L'enjeu environnemental est important puisque, avec la montée globale du niveau marin, les courants côtiers jouent un rôle de plus en plus important dans la modification progressive du littoral, en érodant les côtes mais aussi les récifs coralliens et en assurant également un important transport de sédiments.

*Intervenant

Le changement actuel du niveau barystatique de la mer est sous-estimé à cause de la réponse de la Terre solide aux redistributions de masse du dernier siècle

Maxime Rousselet * ^{1,2}, Kristel Chanard *

³, Alexandre Couhert *

^{1,2}, Pierre Exertier *

², Luce Fleitout *

4

¹ Centre National d'Études Spatiales [Toulouse] – CNES – France

² Géosciences Environnement Toulouse – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National d'Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National des Sciences de l'Univers : UMR5563, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5563, Institut de Recherche pour le Développement : UR254 – France

³ Institut de Physique du Globe de Paris – Institut National des Sciences de l'Univers, Institut National de l'Information Géographique et Forestière [IGN], Université de la Réunion, Institut de Physique du Globe de Paris, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Paris Cité – France

⁴ ENS Paris – Ecole Normale Supérieure de Paris - ENS Paris – France

La montée du niveau moyen de la mer (global mean sea level ; GMSL) est un indicateur direct du changement climatique, reflétant à la fois l'expansion thermique des océans et l'ajout de masse provenant des variations hydrologiques, et de la fonte des glaciers et des calottes glaciaires. Au cours des dernières décennies, les missions GRACE et GRACE-FO ont permis d'estimer directement les variations de masse de l'océan en suivant les changements du champ gravitationnel terrestre. Cependant, ces observations reflètent non seulement la redistribution de masse des enveloppes fluides, mais aussi la réponse mécanique de la Terre solide à cette charge. Les estimations standard de l'évolution de la masse de l'océan fournies par GRACE/-FO supposent que cette réponse est purement élastique, soit instantanée. Cependant, comme la masse de l'océan augmente depuis plus d'un siècle, les observations gravimétriques actuelles peuvent également intégrer la réponse transitoire de la Terre solide à la charge passée. Nous étudions ici comment l'intégration d'une rhéologie transitoire plus réaliste de la Terre solide, contrainte par des

*Intervenant

observations sismologiques et géodésiques, peut affecter les estimations de l'évolution contemporaine de la masse de l'océan à partir de la gravimétrie spatiale. Nous montrons que la prise en compte cohérente de la rhéologie transitoire de la Terre solide et d'un siècle de variation de la masse océanique augmente la tendance de la masse océanique dérivée de GRACE/-FO pour 2003-2022 de 10 % à 20 %, passant de 2,2 mm/an lorsqu'on utilise un modèle purement élastique à 2,4-2,6 mm/an. Cette augmentation reste significative indépendamment des incertitudes observationnelles et des hypothèses de modélisation. Cette biais auparavant négligé représente une étape importante vers la conciliation de l'élévation observée à partir de l'altimétrie satellitaire avec la somme de ses composantes thermique et massique. Elle réduit également le déséquilibre énergétique de la Terre (Earth energy imbalance ; EEI) dérivé de l'absorption de chaleur par les océans, jusqu'à 23 % : de 0,73 W/m² à 0,57-0,65 W/m², en accord avec un déséquilibre estimé à partir des mesures du rayonnement au sommet de l'atmosphère, dans les limites des incertitudes d'observation.

Poster

Cal/Val SWOT : Apport des produits troposphériques GNSS issus de campagnes océanographiques

Aurélie Panetier ^{1,2}, Gaël Andre * ², Clemence Chupin ^{3,4}, Pierre Bosser ^{3,4}

¹ Centre National d'Études Spatiales - CNES – Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, Ministère des Armées – France

² Service Hydrographique et Océanographique de la Marine – Ministère des Armées – France

³ École Nationale Supérieure de Techniques Avancées – Institut Polytechnique de Paris – France

⁴ Laboratoire des sciences et techniques de l'information, de la communication et de la connaissance – Centre National de la Recherche Scientifique, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées – France

Lancé fin 2022, le satellite SWOT (Surface Water and Ocean Topography), porté par le CNES et la NASA, marque une avancée majeure en altimétrie satellitaire grâce à son radar interférométrique en bande Ka (KaRIn), capable de mesurer la topographie des océans et des eaux de surface continentales le long d'une fauchée de 120 km de large. Cette capacité permet, pour la première fois, d'observer la dynamique océanique de type sub-méso et méso-échelle (de quelques centaines à quelques dizaines de kilomètres). Pour corriger les effets atmosphériques sur cette large fauchée, SWOT utilise deux mesures ponctuelles du radiomètre embarqué, situées de part et d'autre du nadir.

Or, Hay et al. (2025) ont montré que l'interpolation entre ces deux points ne permet pas de capturer les variations atmosphériques fines (inférieures à 80 km), notamment dans des zones côtières complexes comme l'Australie, ce qui affecte la qualité des données KaRIn. Dans ce contexte, nous exploitons des données GNSS collectées à bord du navire océanographique L'Atalante lors des campagnes WemSWOT (Shom) et BioSWOT (Ifremer), conduites pendant la phase de calibration/validation (Cal/Val) de SWOT au printemps 2023 en Méditerranée Nord-Occidentale. À l'aide du logiciel GINS du CNES, nous estimons la vapeur d'eau intégrée (CIVE) le long de la trace du navire afin de produire une correction atmosphérique indépendante, à comparer aux mesures SWOT. Après validation croisée avec d'autres sources, ces CIVE permettront d'évaluer la performance du radiomètre SWOT et la pertinence des corrections appliquées aux observations KaRIn. Ce contexte géographique, encadré par les Baléares au sud et la côte méditerranéenne française au nord, peut être particulièrement propice à l'apparition de structures atmosphériques à fine échelle.

Cette étude fournit également une première évaluation des produits troposphériques issus de GINS en mode cinématique, avec une résolution temporelle horaire.

*Intervenant

ALIEDOCS: the Awesome Load-Induced Earth Deformation Online Computation Service

Julien Barnéoud * ^{1,2}, Kristel Chanard ^{1,2}, Paul Rebeschung ^{1,2}, Elie-Alban Lescout ², Elisabeth Pointal ³, Raphael Grandin ³

¹ Institut de Physique du Globe de Paris – Institut National de l’Information Géographique et Forestière [IGN], Institut de Physique du Globe de Paris, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Paris Cité – France

² École nationale des sciences géographiques – Institut National de l’Information Géographique et Forestière [IGN], Université Gustave Eiffel – France

³ Institut de Physique du Globe de Paris – Institut de Physique du Globe de Paris, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Paris Cité – France

Spatio-temporal variations in hydrological, atmospheric, and oceanic mass loads deform the solid Earth’s surface. These displacements, both vertical and horizontal, can be monitored with increasingly more precise geodetic techniques, such as Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). The response of an elastic, spherical, and layered Earth model to surface mass redistribution has been shown to predict fairly well the observed deformation patterns. However, surface displacements predicted from global geophysical fluid models or mass variations observed by the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) and its Follow-On mission (GRACE-FO) often differ, resulting in large variability in deformation models.

To address the need for visualizing, comparing, and interpreting these models, we present the Awesome Load-Induced Earth Deformation Online Computation Service (ALIEDOCS). This web tool centralizes access to a wide range of mass loading models, including hydrological, atmospheric, and oceanic contributions, as well as GRACE/-FO products, and is developed in agreement with the FAIR data principles. ALIEDOCS integrates a user-friendly interface, a database, and an Application Programming Interface (API) designed for multiprocessing computations. Its functionalities are twofold:

Global model map generation - users can interactively visualize loading effects, combine models, apply filters, and adjust spatial or temporal resolution.

Deformation time series computation - users can generate displacement time series at any location on Earth’s surface.

ALIEDOCS provides tools for accessing and comparing loading models and observations, supporting applications ranging from the improvement of geodetic products to the study of hydrosphere–atmosphere–solid Earth interactions.

*Intervenant

Assessment of self-shadowing effect on the SWOT satellite

Suzanne Blondel * ¹, Flavien Mercier ¹, John Moyard ², Alexandre Couhert ², Sabine Houry ³

¹ CNES – CNES – France

² CNES – Centre National d’Etudes Spatiales (Toulouse, France) – France

³ CNES – CNES – France

The NASA-CNES climate science Surface Water and Ocean Topography (SWOT) satellite was successfully launched in December 2022. SWOT is the first space mission that will study nearly all of the water on the Earth’s surface. To complete this global survey and mapping of the finer details of the ocean’s surface topography and water bodies over time, the satellite is equipped with a GPS (Global Positioning System) and DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) dual-frequency receivers, as well as a Laser Retroreflector Array (LRA) to support verification of the challenging Precision Orbit Determination (POD) requirements (1 cm radial rms error) .

SWOT architecture, with large appendages (solar panels, KARIn, radiators) coming out from the main central body, combined with its attitude law, can produce cast shadows. The order of magnitude is of multiple square meters of the satellite’s surface, depending on the position on the orbit and the sun angle w.r.t. the orbit plane. Thus, it is necessary to model those effects.

We will present the current results and efforts underway to improve the modeling of Solar Radiation Pressure (SRP) and assess the amplitude of self-shadowing effects.

First, with the observation of residual signatures of systematic errors related to the Sun’s elevation angle when using the current a priori SRP model. Then, with the computation of self-shadowing effects and the assessment of its amplitude.

*Intervenant

Instrumentation géodésique pour le suivi du niveau d'eau et la cal/val satellite : application au Lac de Guerlédan (France)

Clemence Chupin ¹, Pierre Bosser * ¹, Séverine Enet ², Clémentine Beau ¹, Scott Bedart ¹, Zoé Besnard ¹, Lola Henneuse ¹, Kim Monoury—homet ¹, Siméon Ridel ¹, Jules Faguet ³

¹ École Nationale Supérieure de Techniques Avancées – Institut Polytechnique de Paris – France

² Laboratoire des sciences et techniques de l'information, de la communication et de la connaissance – École Nationale Supérieure de Techniques Avancées – France

³ École nationale des sciences géographiques – Institut National de l'Information Géographique et Forestière [IGN], Université Gustave Eiffel – France

Grâce à son radar interférométrique KaRin, le satellite SWOT peut suivre la dynamique des rivières et des lacs sur Terre avec une résolution sans précédent (1). Les données " Pixel Cloud " (2) fournissent ainsi des informations sur les réservoirs trop petits pour être suivis par l'altimétrie spatiale traditionnelle (3,4), mais essentiels pour comprendre les processus hydrologiques locaux.

Dans le cadre des projets ingénieurs hydrographes et océanographes de l'ENSTA (école d'ingénieur à Brest), nous avons testé les capacités de KaRin sur le lac du barrage de Guerlédan. Une équipe d'étudiants s'est chargée de l'instrumentation du lac, dans le but de comparer les données collectées avec les observations SWOT.

Le projet s'est concentré sur deux axes :

1. Instrumentation in situ du lac : conception d'un dispositif de mesure permettant de surveiller les variations du niveau du lac et de comparer les différentes techniques de mesure. Plusieurs capteurs ont été utilisés :

Des marégraphes à pression ont été mouillés pendant une période de 5 mois afin de suivre les niveaux d'eau à long terme. Des bouées GNSS déployées à la surface garantissent le référencement des capteurs.

Un système combinant GNSS et altimètre acoustique low cost a été développé et déployé pour des observations 2D du niveau d'eau.

Une antenne GNSS fixe a été installée pour des mesures de réflectométrie- interférométrie GNSS (GNSS-IR).

*Intervenant

Un marégraphe radar autonome EPONIM (5), prêté par le Shom, a été installé au sommet du barrage pour la comparaison de tous les systèmes.

2. Analyse des données SWOT : traitement et analyse des données SWOT HR Raster 100 m (6) dans la zone (masques, paramètres de correction, etc.), et comparaison spatiale et temporelle avec les données in situ.

L'instrumentation déployée est fonctionnelle, et fournit des observations cohérentes des niveaux d'eau, malgré des biais inter-capteurs de l'ordre de 4 à 10 cm qui font encore l'objet d'analyses. Des données SWOT ont pu être récupérées sur le lac, mais une analyse approfondie des paramètres et corrections appliquées est nécessaire pour comprendre les écarts observés avec les données in situ.

Références

- (1) L. Fu et al., "The Surface Water and Ocean Topography Mission: A Breakthrough in Radar Remote Sensing of the Ocean and Land Surface Water," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 51, no. 4, 2024. doi: 10.1029/2023GL107652.
- (2) SWOT, "SWOT Level 2 Water Mask Pixel Cloud Data Product." NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, 2024. doi: 10.5067/SWOT-PIXC-2.0.
- (3) L. Maubant, L. Dodd, and P. Tregoning, "Assessing the Accuracy of SWOT Measurements of Water Bodies in Australia," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 52, no. 6, 2025. doi: 10.1029/2024GL114084.
- (4) S. Wu et al., "SWOT mission enables high-precision and wide-coverage lake water levels monitoring on the Tibetan Plateau," *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 59, 2025. doi: 10.1016/j.ejrh.2025.102357.
- (5) Shom, "EPONIM - Equipement Ponctuel pour l'Observation du Niveau de la Mer," 2017. Accessed: May 26, 2025. (Online). Available: <https://refmar.shom.fr/sites/default/files/2024-02/FT-maregraphe-deployable-EPONIM-2017.pdf>
- (6) SWOT, "SWOT Level 2 Water Mask Raster Image Data Product." NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, 2024. doi: 10.5067/SWOT-RASTER-2.0.

MILLS: MITigation Leakage through Least Square – A new method to estimate regional mass variations from GRACE/-FO

Louis-Marie Gauer ^{*} ¹, Kristel Chanard ², Luce Fleitout ³, Jean-François Crétaux ¹, Raphael Grandin ², Alejandro Blazquez ¹, Etienne Berthier ¹

¹ Laboratoire d'études en Géophysique et océanographie spatiales – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National d'Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Institut de Physique du Globe de Paris – Université Paris Cité, Centre national de la recherche scientifique - CNRS (France), IGN – France

³ Laboratoire de Géologie, École Normale Supérieure, Université PSL, CNRS, Paris, France – Université PSL – France

Variations in water mass redistribution are a critical indicator of climate change, revealing processes such as global continental desertification and cryosphere melting. The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) and Follow-On (GRACE-FO) satellite missions have provided over 20-yr of essential records of Earth's mass variations, significantly advancing our understanding of climate-driven processes.

However, GRACE/-FO spherical harmonic solutions suffer from aliasing errors, as well as measurement uncertainty, manifesting as North/South striping due to propagation of correction model errors and temporal averaging of the signal. While filtering is necessary to reveal meaningful geophysical signals, it introduces leakage and bias by causing signals to smear beyond their location, which impacts the accuracy of regional mass estimates. To overcome these limitations, we introduce MILLS (MITigation Leakage through Least Square), a new method for estimating regional mass variations from GRACE/-FO Level-3 solutions. MILLS leverages knowledge on solution-specific spherical harmonic filters to correct signal leakage and bias. It computes the least square regression between a filtered artificial uniform unit source signal over the region of interest and the similarly filtered GRACE/-FO solution for each time step. The affine models are then applied to non-filtered unit source signal, effectively mitigating leakage and bias, thus improving time-dependent regional mass estimates.

We validate MILLS over the Caspian Sea, an ideal test case due to its large size, significant mass depletion signal, and minimal contamination by external geophysical signals. Comparison of MILLS-derived mass estimate with independent estimates from altimetry and in situ tide gauges demonstrates the method's effectiveness in isolating sources and resolving the phase of the annual variations, which is usually uncertain in other methods due to the disturbance caused by regional signals. We then apply MILLS to glacial regions to evaluate its capability for monitoring glacier mass change. Although glacier regions present greater challenges than the Caspian Sea due to more complex external geophysical signals to account for, preliminary results

*Intervenant

of MILLS-derived glacier mass change show good agreement with independent estimates from optical imagery.

Etude de la séquence de Totoral de 2020 dans la région d'Atacama (Chili), à partir de séries temporelles InSAR FLATSIM

Léonie Leroux * ¹, Emilie Klein ², Manon Dalaison ³

¹ Laboratoire de Géologie - Département de Géosciences - Ecole Normale Supérieure – INSU, CNRS : UMR8538, École normale supérieure [ENS] - Paris 24 Rue Lhomond 75231 PARIS CEDEX 05 - France – France

² Laboratoire de Géologie - Département de Géosciences - École Normale Supérieure, PSL Research University, Paris, France – INSU, CNRS : UMR8538, École normale supérieure [ENS] - Paris – France

³ IPGP Paris – Institut de Physique du Globe de Paris, IPGP, Paris, France – France

La région d'Atacama, située au cœur de la subduction chilienne, est une zone où l'aléa sismique est important. Entre les grands séismes destructeurs, une diversité d'événements sismo-tectoniques (séismes, essaims, glissements lents) sont enregistrés. La séquence de Totoral du 1er septembre 2020, se distingue par un enchaînement atypique de trois séismes de magnitude $M_w > 6$ en moins de 24 heures. Cette région est activement surveillée grâce au déploiement d'un ensemble de stations permanentes et sites de campagne GPS, qui permettent d'étudier quotidiennement les déformations de la zone. De nouvelles séries temporelles de déformation mesurées par InSAR ont été publiées par FLATSIM (FormaTerre), et couvrent la totalité de l'Atacama. Ces nouvelles observations apportent une résolution spatiale plus étendue que le GPS. Pour étudier la séquence de Totoral à l'aide des séries temporelles InSAR, deux méthodes d'extraction ont été implémentées. La première est une décomposition paramétrique par moindres carrés, qui permet d'extraire le saut cosismique de la séquence, en imposant un modèle d'évolution de la déformation simplifié. La deuxième est une analyse en composantes indépendantes (ICA), plus complexe à implémenter, mais qui reste une méthode de séparation de source sans a priori. La carte des déformations cosismiques de la séquence de Totoral obtenue est ensuite utilisée pour quantifier le glissement sur le plan de faille lié à cet événement. Les résultats de cette inversion donnent une zone de glissement de $80 \times 50 \text{ km}^2$, avec un glissement maximal de 529 mm équivalent à une magnitude $M_w 7.0$, en accord avec la sismologie et les données GPS.

*Intervenant

Using joint geodetic data to estimate viscous surface velocities in Antarctica due to past and recent ice sheet changes

Anthony Memin ^{*} ¹, Riad Hassani ², Alexandre Boughanemi ³

¹ Geoazur – Université Côte d’Azur, CNRS, IRD, Observatoire de la Côte d’Azur, Géoazur – France

² Géoazur – Université Côte d’Azur, IRD, CNRS, Observatoire de la Côte d’Azur, Géoazur – France

³ Magellium – Magellium – France

In Antarctica, estimates of the glacial isostatic adjustment (GIA) effects are quite imprecise with GIA-induced mass changes ranging from 40 to 150 Gt/yr, although models seem to converge since 2012 around 40 – 80 Gt/yr. The variability obtained from one model to another is significant with important geophysical and geodetic implications. We have developed an inversion strategy that allows estimating viscous surface displacement in Antarctica without restrictive assumptions on the viscosity structure and the rheology of the Earth’s mantle and without using a priori models to account for the densification of the ice sheet. The methodology we developed assumes that current ice sheet changes occur within a thin layer on the Earth’s surface and that in response the Earth deforms viscoelastically. The elastic part of this response is modeled using the PREM model. We assume that surface displacements and satellite gravity variations, induced by viscous deformations, are related using a gravimetric gradient value. The strategy aims to jointly invert monthly satellite altimetry and gravimetry data as well as GNSS positioning series to determine the coefficients of the spherical harmonic decomposition of ice sheet thickness variations, surface mass densities, and displacements associated with viscous surface deformations. Preliminary tests performed on realistic synthetic data show that this new approach can recover coefficients up to harmonic degree 40. The parameters, maps and data predicted by the inversion are close to within few percent of those expected.

*Intervenant

Le Service National d'Observation Gravimétrie

Anthony Memin *¹, Jean-Daniel Bernard², Sylvain Bonvalot³, Jean-Paul Boy², Cécilia Cadio⁴, Nicolas Le Moigne⁴, Sylvain Lucas⁵, Sébastien Merlet⁶, Séverine Rosat², Lucía Seoane³, Didier Rouxel⁵, Christel Tiberi⁴

¹ Geoazur – Université Côte d’Azur, CNRS, IRD, Observatoire de la Côte d’Azur, Géoazur – France

² Université de Strasbourg, CNRS, EOST, ITES, UMR 7063 – Université de Strasbourg, CNRS, EOST, ITES, UMR 7063 – France

³ GET, Observatoire Midi-Pyrénées, Université de Toulouse, CNRS, IRD, CNES – GET, Observatoire Midi-Pyrénées, Université de Toulouse, CNRS, IRD, CNES – France

⁴ Université Montpellier, CNRS, Géosciences Montpellier – Université Montpellier, CNRS, Géosciences Montpellier – France

⁵ Service hydrographique et océanographique de la marine, département de géophysique marine – Service hydrographique et océanographique de la marine, département de géophysique marine – France

⁶ LNE-OP / LTE, Observatoire de Paris, Université PSL, Sorbonne Université, Université de Lille – LNE-OP – France

Le Service National d’Observation Gravimétrie (SNOG) assure le suivi des réseaux d’observations et contribue aux services de l’Association internationale de géodésie (AIG).

Il assure ainsi le suivi du réseau permanent gravimétrique (RPG) et des réseaux répétés gravimétriques (RRG). Le RPG est en particulier constitué de cinq stations multi-instrumentées, dont quatre colocalisant des mesures absolues avec des mesures de variations temporelles de la gravité à l’aide de gravimètres supraconducteurs permanents. Le SNOG contribue également au bureau central de deux services scientifiques internationaux de l’IAG: le Bureau Gravimétrique International (BGI) et le Service international de géodynamique et des marées terrestres (IGETS). Les données que le SNOG récolte et distribue sont utilisées par différentes communautés pour observer les variations de masses à toutes échelles (surface, croûte, manteau...) ainsi que pour vérifier la stabilité verticale des références (marégraphes, etc.).

En constante évolution pour répondre aux besoins de ses communautés scientifiques et les nouveaux déploiements technologiques, nous présentons les différentes composantes du SNOG, les missions d’observations qu’il pilote et les perspectives de développement, en particulier pour ce qui concerne la gravimétrie spatiale

*Intervenant

Identification of defects in satellite gravimetry solutions with artificial intelligence

Thomas Vaujour ¹, Julia Pfeffer * ¹, Chloé Thenoz ¹, Sean Bruinsma ²,
Jean-Michel Lemoine ²

¹ Magellium – Magellium, Ramonville Saint-Agne, France – France

² Géosciences Environnement Toulouse – Centre National d’Études Spatiales [Toulouse] – France

The Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE) and GRACE-Follow on (GRACE-FO) missions have enabled the measurement of spatial and temporal variations in Earth’s gravity field. However, GRACE and GRACE-FO solutions are affected by systematic errors, identified as elongated stripes in the North-South direction, which are usually reduced by the application of filters (Gaussian, DDK, VDK, diffusive) or by the application of constraints during the inversion of satellite data (Level 1B). The singular value decomposition method used by CNES to produce Level 2 gravity field solutions is an effective way to reduce the noise level but some defects still remain in their products. This study shows that such defects can be effectively identified using artificial intelligence models, such as random forests and convolutional neural networks. New metrics, based on the number of defects detected with artificial intelligence, have been developed to evaluate the noise level in the solutions. Artificial intelligence techniques can therefore prove extremely useful for identifying the noise level and locating the defects in temporal gravity field solutions. The proof of concept has been designed for the CNES-TSVD solutions but the models can also be used on Cholesky solutions of other processing centers. As the characteristics of the defects may radically change from one center to the other, the models’ detection performance on other solutions is not guaranteed.

*Intervenant

Satellite observations of the 2023 Loyalties Island, 2025 Drake Passage and Kamchatka Tsunamis

Lucie Rolland * ¹, Jean Roger , Antoine Delepouille , Fuentes Mauricio , Yannice Faugère , Hélène Hébert , Michela Ravanelli , Gabriela Herrera , Patricio Toledo , Boris Maletckii , Clélia Maréchal , Elvira Astafyeva , Dylan Mikesell , Christelle Saliby

¹ Géoazur (GEOAZUR) – Observatoire de la Cote d’Azur, IRD, CNRS : UMR7329, Université de Nice Sophia-Antipolis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, INSU – 250 av. A. Einstein, 06560 Valbonne, France

Two years after the first image of a tsunami triggered by the 19 May 2023 Mw 7.8 Loyalties island earthquake in the Southwest Pacific Ocean (Faugère et al., 2024, Roger et al., under review), the NASA/CNES SWOT altimeter has caught new tsunami wave features in the South Atlantic Ocean on 2 May 2025, and a couple months later, in the North Pacific Ocean, combining the unprecedented resolution and accuracy of the KaRIn instrument (Ka-band Radar Interferometer) and tsunami predictions. The satellite sea-surface height observation and the tsunami simulation show clear and similar wave-like structures. The first tsunami was initiated about 5 hours earlier within the Drake passage ~ 100 km off Cape Horn, the southernmost tip of Chilean Patagonia, by a rare Mw 7.4 earthquake. To prevent a potentially severe impact on the coastal populations mainly associated to limited knowledge of tsunamis in the region, Hydrographic Service of Chilean Navy (SHOA) issued an evacuation alert in South of Chile and Antarctica. This alert was cancelled a couple of hours later. The second tsunami was initiated offshore the Kamchatka peninsula on 29 July 2025 by a Mw 8.8 earthquake, with warning of possible destructive impact issued by the Pacific Warning Center (PTWC) not only for the nearby Russian coasts but also in Alaska, Japan, Hawaii, French Polynesia and American coasts. In both events, the lack of immediately available data explains the wrong evaluation (in these cases overestimation) of the tsunami threat. However, in addition to altimeters, GNSS stations close-by, some with real-time capability, also recorded the ionospheric signature of the earthquake and, in the case of Kamchatka, of the tsunami itself. In this presentation, we show how, by analyzing the SWOT dataset and nadir altimeters datasets, the complex source processes that triggered the tsunami can be better constrained, notably comparing the 2D tsunami wave field photographed by SWOT with multiple tsunami numerical models. We finally highlight the potential added-value of satellite measurements by space altimeters and GNSS from various platforms (ground, ocean or space-based) to future tsunami warning systems.

*Intervenant

Liste des sponsors



CNES

Centre National d'Études Spatiales



OMP

Observatoire Midi-Pyrénées



UT

Université de Toulouse



CNFGG

Comité National Français de Géodésie et Géophysique