

Assimilation de données géodésiques et estimation de références pour l'étude du changement climatique – Présentation du projet ANR GEODESIE

■ David COULOT - l'équipe du projet GEODESIE*

Le projet GEODESIE vise à déterminer des références géodésiques globales, cohérentes et de grande exactitude (séries temporelles de repères terrestres et célestes, de paramètres d'orientation de la Terre et d'orbites de satellites d'observation de la Terre) par un retraitement optimal de l'ensemble des données de géodésie spatiale disponibles depuis le début des années 1980. Ces références seront mises à disposition des communautés de recherche géophysiques et climatiques pour de meilleures estimations de la montée du niveau des mers, de la fonte des glaces récente et du changement climatique global. Des séries temporelles de niveaux des mers géocentriques, calculées avec les données des altimètres satellitaires et les enregistrements des marégraphes, sur la base de ces références, seront également fournies après la fin du projet.

MOTS-CLÉS

Géodésie spatiale, assimilation de données, niveau des mers

puisque l'augmentation est estimée à 2,7 mm/an sur la période 1993-2004 et à 3,5 mm/an sur la période 2004-2015 (Cazenave, 2017). Cette rupture dans le taux de montée du niveau des mers pose de nombreux défis sociaux et environnementaux – risques de submersion, phénomènes d'érosion, intrusion d'eau salée dans les eaux de surface, etc. – de même que, plus généralement, tous les risques induits par le changement climatique – augmentation des températures, acidification des océans, événements météorologiques extrêmes plus fréquents, modification des précipitations, des écosystèmes, etc. (Church et al., 2013).

La hausse globale du niveau des mers observée sur l'ère altimétrique est maintenant bien expliquée par les modèles de ses contributeurs majeurs (expansion thermique, contributions

Contexte du projet

Le niveau des mers est l'un des meilleurs indicateurs du changement climatique global : il constitue en effet une réponse intégrée des changements de température planétaire (Cazenave, 2017). C'est d'ailleurs l'une des variables climatiques essentielles retenues par l'ESA (European Space Agency) pour son programme CCI (Climate Change Initiative, cci.esa.int). Le niveau moyen des mers actuel augmente rapidement, en comparaison aux millénaires précédents. Pour le XX^e siècle (1900-1990), les estimations récentes de cette augmentation varient

entre $1,1 \pm 0,3$ mm/an (Dangerdorf et al., 2017) et $1,9 \pm 0,3$ mm/an (Jevrejeva et al., 2014). Pour l'ère altimétrique (1993-2016), cette augmentation est estimée à $3,0 \pm 0,4$ mm/an, incluant une accélération sur cette période,

* Soit, par ordre alphabétique, Richard BIANCALE, Christian BIZOUARD, Pascal BONNEFOND, Sébastien BOUQUILLON, Xavier COLLILIEUX, Florent DELEFLIE, Bruno GARAYT, Sébastien LAMBERT, Julien LAURENT-VARIN, Jean-Michel LEMOINE, Jean-Charles MARTY, Flavien MERCIER, Laurent MÉTIVIER, Benoît MEYSSIGNAC, Samuel NAHMANI, Félix PEROSANZ, Arnaud POLLET, Paul REBISCHUNG, Franck REINQUIN, Jean-Yves RICHARD, Franck TERTRE, Guy WÖPPELMANN.

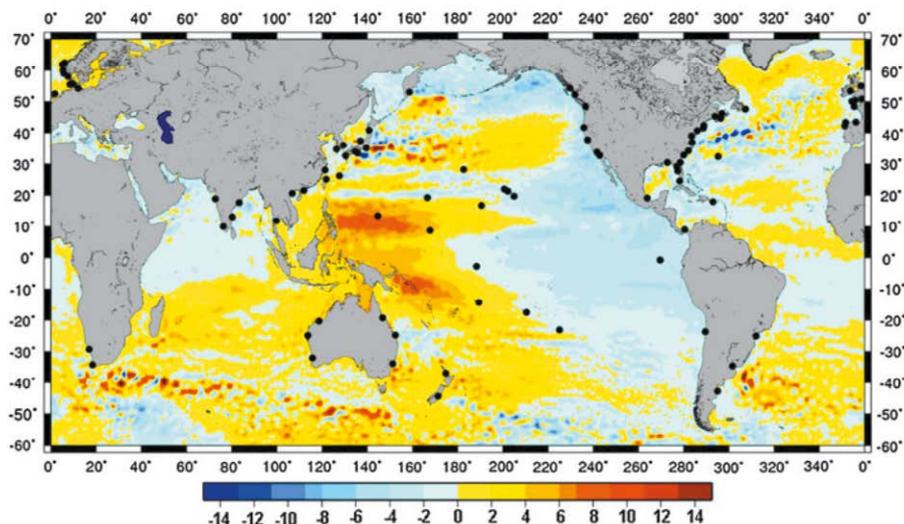


Figure 1. Variations spatiales des tendances dans les séries de niveau des mers calculées à partir de données d'altimétrie satellitaire (1993-2009). Une tendance globale de 3,2 mm/an a été enlevée. Les points noirs matérialisent les positions de 91 marégraphes utilisés pour des reconstructions de niveaux des mers (Meysnigac et al., 2012).

des glaciers, des calottes polaires, des variations du stock d'eau sur les continents (Dieng et al., 2017)). En revanche, ses variations régionales (voir la Figure 1), qui informent sur différents processus [circulation océanique, variations locales de la température et de la salinité des océans, effets associés au rebond postglaciaire¹ et fonte actuelle des glaces continentales (Meysignac & Cazenave, 2012)], restent encore à mieux comprendre (Cazenave, 2017). Des enjeux scientifiques importants demeurent donc, que ce soit pour l'observation à long terme du niveau des mers et de ses contributeurs, la réduction des incertitudes sur les déterminations du niveau des mers et la compréhension de ses contributeurs mineurs (Meysignac, 2016).

La géodésie spatiale fournit les références nécessaires pour répondre à de tels enjeux. En effet, l'évolution du niveau des mers, dans un repère absolu, est aujourd'hui déterminée par altimétrie satellitaire (Ablain et al.,

2017) et par combinaison d'enregistrements de marégraphes et de données acquises par des antennes GNSS (*Global Navigation Satellite System*) situées dans leur voisinage proche² (Wöppelmann & Marcos, 2016). De plus, l'étalonnage des altimètres satellitaires, fondamental pour l'altimétrie, nécessite de disposer de positions très précises de stations géodésiques au sol, exprimées dans un repère terrestre global (Bonnefond et al., 2011).

Le Repère international de référence terrestre ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*, en anglais) est l'une de ces références (Altamimi et al., 2016). L'ITRF est un repère, en co-rotation avec la Terre dans son mouvement dans l'espace, matérialisé par la donnée de coordonnées géocentriques et de leurs dérivées linéaires au cours du temps d'un ensemble de stations d'observations géodésiques réparties sur l'ensemble du globe. Il permet en particulier la détermination des orbites³ précises des satellites

embarquant un altimètre radar, pour laquelle les coordonnées des stations sont fixées pendant les calculs. De plus, cette détermination des orbites dans un repère global stable dans le temps est fondamentale pour pouvoir faire rigoureusement le lien entre les résultats fournis par les différentes missions altimétriques successives. Il permet également l'estimation de vitesses verticales, dans un repère global absolu, pour les antennes GNSS colocalisées avec des marégraphes attachés à la croûte terrestre, et dont les enregistrements sont donc affectés de ses mouvements. En conséquence, de la qualité de l'ITRF dépend en partie la qualité des déterminations du niveau des mers. À titre d'exemple, la Figure 2 montre les différences dans les tendances régionales du niveau des mers, déterminées par altimétrie, constatées pour la transition entre les deux déterminations les plus récentes de l'ITRF, l'ITRF2008 et l'ITRF2014. Si la moyenne globale de ces différences est négligeable, les effets induits à haute latitude ne le sont pas, et peuvent même atteindre une valeur de $\pm 0,5$ mm/an. La Figure 3 montre les erreurs dans les déterminations des vitesses verticales, induites par le

1 Phénomène engendrant une remontée régulière du sol de quelques centimètres par an, principalement en Scandinavie et en Amérique du Nord, en réponse à la dernière déglaciation il y a quelques milliers d'années.

2 On parle alors de "colocalisation".

3 Positions et vitesses géocentriques d'un satellite données au cours du temps. Les orbites des satellites d'observation de la Terre constituent également des références géodésiques.

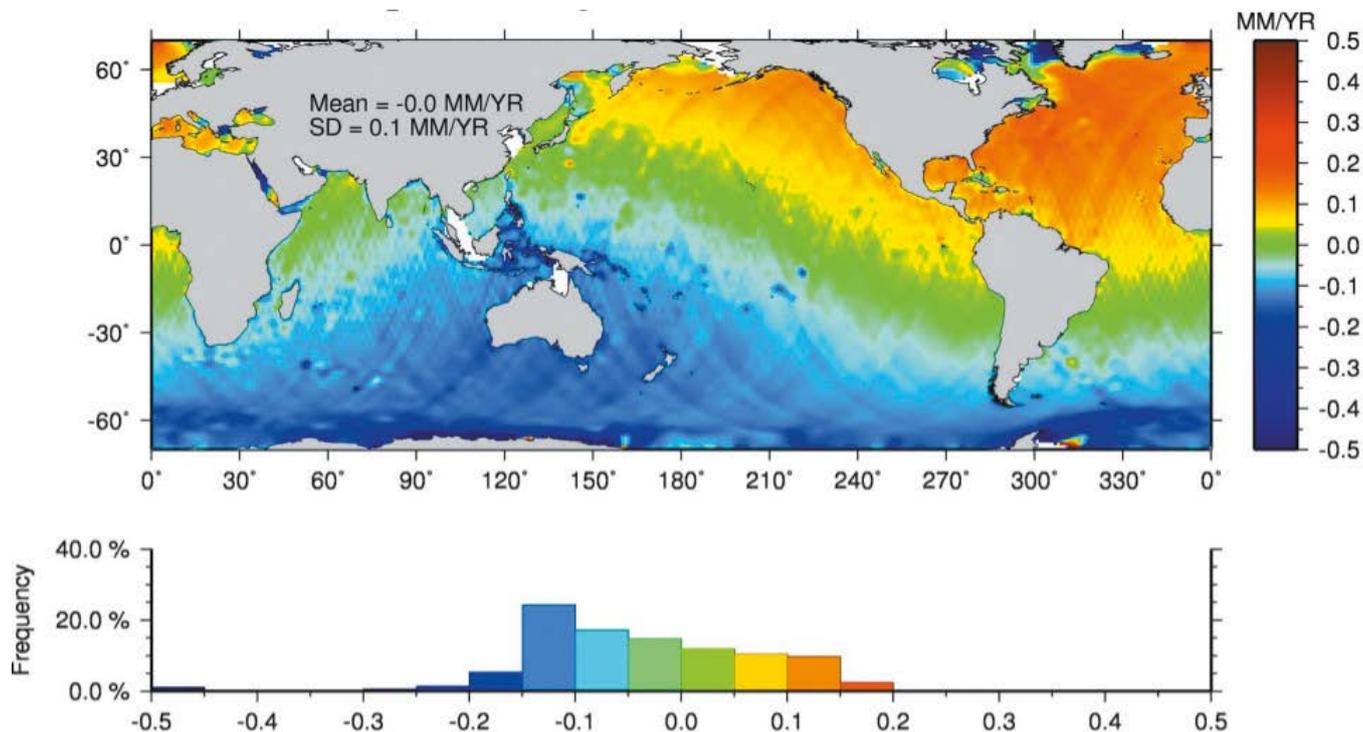


Figure 2. Impact sur les déterminations des niveaux des mers régionaux (mm/an) de la transition de l'ITRF2008 vers l'ITRF2014 (Beckley et al., 2016).

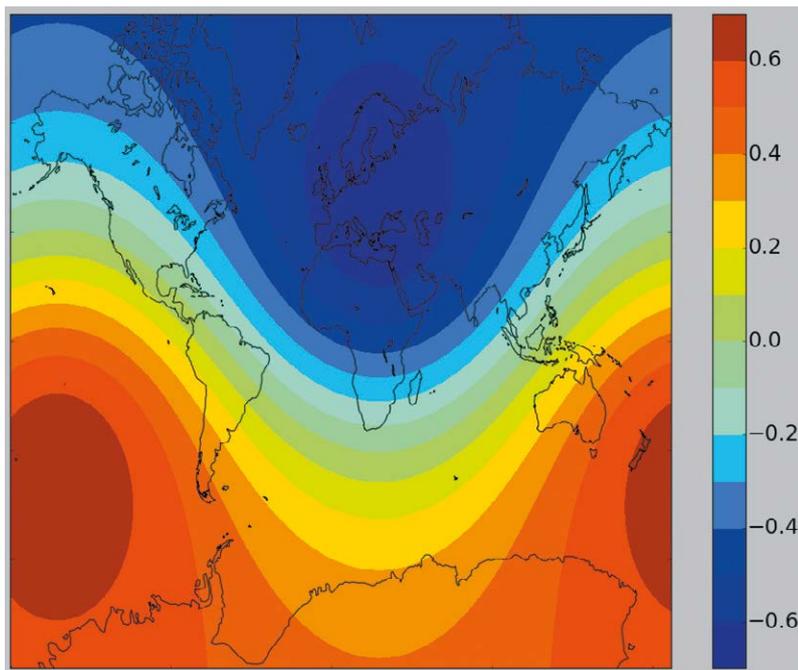


Figure 3. Erreurs dans les vitesses verticales (mm/an) calculées, sur toute la surface terrestre, à partir des erreurs dans les dérives de l'origine de l'ITRF2008 estimées par Wu et al. (2011), en suivant l'approche de Collilieux & Wöppelmann (2011).

niveau d'erreur estimé pour l'évolution dans le temps de l'origine de l'ITRF. Ces erreurs peuvent atteindre $\pm 0,6$ mm/an et se répercuter directement dans les déterminations du niveau des mers effectuées à partir des enregistrements des marégraphes corrigés de ces vitesses.

Si la référence ITRF est essentielle pour la détermination du niveau des mers, elle l'est également pour nombre d'applications en Sciences de la Terre. Ce rôle fondamental a été récemment entériné par les Nations Unies dans la résolution A/RES/69/266 "A global geodetic reference frame for sustainable development", adoptée le 26 février 2015⁴. Pour cette raison, des objectifs de qualité stricts ont été fixés pour cette référence géodésique à l'horizon 2020, dans le cadre de l'initiative GGOS (Global Geodetic Observing System, www.ggos.org) de l'AIG (Association internationale de géodésie, www.iag-aig.org) : "The current scientific and societal user requirements are demanding in terms of accuracy, resolution, latency and reliability, and the requirements are expected to increase in the future. The GGOS products must have

sufficient accuracy, temporal and spatial resolution, and latency to meet these requirements, which can be achieved by meeting the most demanding requirements. [...] In order to have a frame at least an order of magnitude more accurate than the signal to be monitored, the terrestrial reference frame should be accurate at a level of 1 mm and be stable at a level of 0.1 mm/yr." (Plag & Pearlman, 2009). Ces niveaux ne sont pas encore atteints aujourd'hui, même si la qualité des déterminations successives de l'ITRF s'améliore (Altamimi et al., 2016).

De plus, ces exigences de qualité doivent porter, non seulement sur la référence ITRF, mais aussi sur l'ensemble des références fournies par la géodésie spatiale (repères terrestre et céleste⁵, paramètres d'orientation de la Terre⁶, orbites des satellites, etc.). En effet, ces références contribuent significativement aux déterminations d'indicateurs majeurs du changement climatique global, tels que la mesure du niveau des mers pris précédemment en exemple introductif. De plus, les références géodésiques sont égale-

ment fondamentales pour répondre à certains enjeux en géophysique (amélioration des modèles de rebond postglaciaire, p. ex.) ou en astronomie (détection d'éventuels artefacts, liés aux réseaux de radiosources observés, dans les séries temporelles de positions de quasars extra-galactiques, p. ex.).

Une voie⁷ d'amélioration potentielle de la qualité des références géodésiques est le traitement direct et simultané de l'ensemble des mesures de géodésie spatiale, qui doit permettre d'étudier et de résoudre rigoureusement les incohérences constatées entre les différentes techniques de mesure lors des traitements de leurs données respectives (Biancale, 2011). Ce type d'approche a émergé au début des années 2000 et, depuis, le GRGS (Groupe de recherche de géodésie spatiale⁸, dont font partie tous les participants du projet) a toujours été très impliqué dans les recherches sur ces combinaisons au niveau des observations (Yaya, 2002 ; Coulot, 2005 ; Pollet, 2011 ; Zoulida, 2016). Dans ce cadre, une attention particulière a été récemment portée aux satellites embarquant des instruments de plusieurs techniques géodésiques (DORIS – Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, GPS – Global Positioning System et SLR – Satellite Laser Ranging), tels que les satellites altimétriques de la série Jason (Zoulida et al., 2016). Ces satellites peuvent en effet être considérés comme des sites de colocalisation dans l'espace, complémentaires aux sites de colocalisation au sol (Figure 4), pour lesquels les positions relatives des points de référence des différents instruments de mesure sont connues très précisément. Cette attention portée à ces satellites dits "multi-techniques" va encore s'accroître dans un futur proche, avec l'arrivée possible de satellites tels que GRASP (Geodetic Reference Antenna in SPace) et E-GRASP (European-GRASP). Ce type de satellite est en effet conçu comme le satellite géodésique multi-techniques qui nous manque actuellement, avec (i) un instrument

4 Voir www.un.org/fr/documents/view_doc.asp?symbol=A/RES/69/266.

5 Repère fixe par rapport aux étoiles.

6 Paramètres permettant le passage entre les repères terrestre et céleste.

7 Qui est celle empruntée par le projet GEODESIE.

8 grgs.obs-mip.fr.



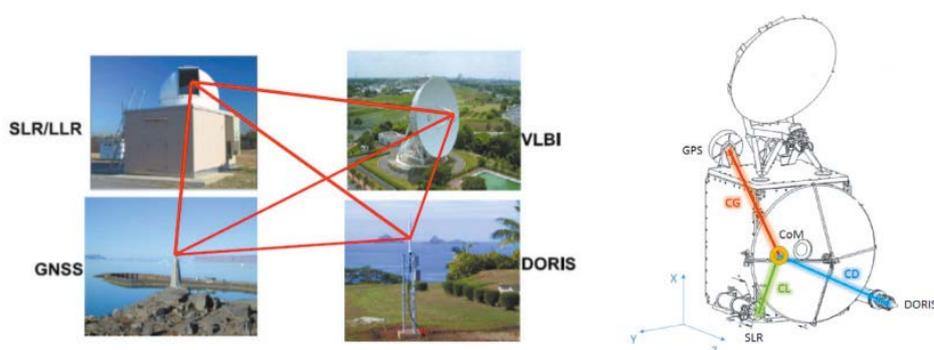


Figure 4. Gauche : rattachement local au sol (Altamimi, communication personnelle, 2016). Droite : rattachement spatial sur Jason-2 (Zoulida, 2016).

dont les signaux seront observables par les antennes de la technique de mesure VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), (ii) des instruments DORIS, GNSS et SLR, et (iii) un étalonnage très précis de ces instruments. Son principal objectif est la détermination d'un repère de référence terrestre présentant le niveau de qualité fixé par GGOS à l'ITRF (Coulot, 2015). Deux propositions de missions spatiales GRASP ont été soumises, sans succès, par le JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) et l'Université Boulder Colorado en réponse à des appels à mission de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) en septembre 2011 et en décembre 2015. Une première proposition de mission spatiale E-GRASP, portée par un consortium majoritairement européen, a été soumise, sans succès, en juin 2016, en réponse à l'appel à missions EE9 (*Earth Explorer 9*) de l'ESA (*European Space Agency*). Une nouvelle proposition E-GRASP, portée par un consortium proche de celui de 2016, a été soumise en juin 2017, en réponse à l'appel à missions EE9 fast-track, lancé par l'ESA après l'appel EE9, à l'issue duquel aucune proposition soumise n'avait été retenue. Les deux missions retenues pour une phase A par l'ESA seront connues fin 2017. Le GRGS a été impliqué dans l'ensemble de ces propositions de mission et, en particulier, dans les deux propositions E-GRASP (Pollet et al., 2015 ; 2017).

À ce contexte s'ajoute également le fait que la communauté géodésique française, fédérée au sein du GRGS, est très impliquée dans les services de l'IERS (*International Earth Rotation and*

Reference Systems Service, www.iers.org), au travers de centres de produit, de combinaison et d'analyse. Nous comptons de plus, dans la communauté française, des experts mondialement reconnus dans les domaines de la détermination du niveau des mers, de ses variations et de leurs contributeurs climatiques, impliqués pour certains dans les missions altimétriques Jason, avec, en sus, un établissement national, le Shom (Service hydrographique et océanographique de la marine), acteur majeur dans les domaines de l'hydrographie et de l'océanographie.

Le très grand nombre de données mises en jeu et la nécessité de prendre en compte des corrélations dans l'espace et dans le temps pour certains paramètres d'intérêt (les positions de stations, p. ex.) et, à terme, des modélisations physiques de certains phénomènes, font de l'assimilation de données⁹ le cadre idéal pour atteindre les objectifs fixés par GGOS. Cette idée d'utiliser des méthodes issues de l'assimilation de données en géodésie est d'ailleurs portée depuis plusieurs années par Claude Boucher, actuel président du CNFGG (Comité national français de géodésie et de géophysique), dans le cadre d'un axe de recherche innovant du pôle de recherche sur les systèmes de référence terrestres (Boucher, 2015). De plus, les approches de type filtrage/lissage de Kalman, issues de l'assimilation de données, ont un long héritage en géodésie spatiale, comme l'attestent, entre autres exemples, les travaux de

⁹ Abondamment utilisée en météorologie, en océanographie et pour l'étude du système climatique.

Herring et al. (1990) et de Wu et al. (2015).

Tous ces éléments ont donné naissance à la proposition de projet GEODESIE (*GEOdetic Data assimilation and ESTimation of references for climate change InvEstigation*), soumise en réponse à l'appel à projets générique 2016 de l'ANR (Agence nationale de la recherche), dans le défi "Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique", et dans l'instrument de financement JCJC (Jeune chercheuse jeune chercheur). Le projet a été accepté par l'ANR, pour un financement sur une période de quatre ans (2017-2020). Il a été officiellement lancé le 9 mars 2017 au LAREG. Nous présentons brièvement, dans la suite de cet article, les principaux objectifs du projet, les grandes étapes de son déroulement et, enfin, l'équipe du projet.

Objectifs scientifiques du projet

Les objectifs du projet GEODESIE, tels qu'explicités dans la proposition soumise à l'ANR en 2016, sont les suivants :

- Démontrer toutes les possibilités offertes par les combinaisons directes d'observations de géodésie spatiale pour déterminer les références requises pour répondre aux enjeux en observation et surveillance du système Terre.
- Assimiler, avec une méthode spécifique, prenant en compte tous les liens possibles entre les techniques et fournissant simultanément l'ensemble des références, toutes les données spatiales disponibles depuis l'avènement de la géodésie spatiale pour les cinq techniques de mesure (DORIS, GNSS, LLR – *Lunar Laser Ranging*, SLR et VLBI).
- Fournir des références de grande qualité aux communautés de recherche en géophysique, océanographie, climat, astronomie et géodésie.
- Fournir de même des séries temporelles de niveaux des mers calculées, à partir des mesures d'altimétrie satellitaire et des enregistrements des marégraphes, avec ces références.



- Renforcer la position de l'équipe projet et, par extension, du GRGS comme expert mondial sur les combinaisons/assimilations de données spatiales.
- Préparer la possible arrivée dans un futur proche de satellites tels que GRASP et E-GRASP.

L'atteinte de ces objectifs suppose la levée de certains verrous scientifiques et difficultés techniques explicités dans Coulot et al. (2017) et évoqués dans la section suivante.

Grandes étapes du projet

La *Figure 5* présente schématiquement les grandes étapes du projet. Le projet, dont le déroulement a été pensé sur quatre ans, se déroulera en deux grandes phases de deux ans chacune.

Durant la première phase (2017-2018), des travaux d'expérimentation, de modélisation et d'implémentation se dérouleront en parallèle. Les expérimentations viseront principalement à répondre aux questions scientifiques posées par la détermination optimale des références géodésiques. Elles portent sur (i) les liens possibles entre les techniques et leur prise en compte

optimale (liens spatiaux fournis par les satellites multi-techniques (Thaller et al., 2013 ; Zoulida et al., 2016) et liens au sol entre instruments colocalisés (Sarti et al., 2004), questions 1 et 2 dans la *Figure 5*), (ii) la possible contribution des observations par des antennes VLBI de satellites GNSS (Planck et al., 2017) et des mesures hybrides VLBI/GNSS (Kwak et al., 2012) à l'amélioration des déterminations des références géodésiques (question 3 dans la *Figure 5*) et, enfin, (iii) la possible contribution des GNSS à la définition de l'origine et de l'échelle¹⁰ des repères terrestres pour laquelle des publications récentes (Rebischung et al., 2014 ; Haines et al., 2015 ; Kuang et al., 2015 ; Zoulida et al., 2016) ont ouvert le débat (question 4 dans la *Figure 5*). La modélisation concernera principalement le modèle d'évolution du filtre au cœur du logiciel de combinaison/assimilation de données du projet. Ce modèle reflète l'évolution temporelle potentiellement partiellement aléatoire de l'ensemble des paramètres estimés pour la détermination des références ; il est indispensable au filtre (Simon, 2006). Enfin, la phase d'implémenta-

10 Coefficient radial de dilatation du repère.

tion consistera à développer, dans un premier temps, un prototype du logiciel de combinaison/assimilation de données et, dans un second temps, le logiciel final du projet. Ce dernier sera basé sur les logiciels GINS [Géodésie par intégrations numériques simultanées, (Marty et al., 2011)] du CNES et LOCOMOTIV [Logiciel de combinaison des observations des techniques internationales et de validation, (Pollet, 2011)] du LAREG.

Durant la seconde phase (2019-2020), deux types de travaux seront menés, parfois en parallèle : (i) le calcul des références géodésiques avec le logiciel de combinaison/assimilation de données et le calcul des séries temporelles de niveaux des mers avec ces références, à partir des mesures d'altimétrie et des enregistrements des marégraphes ; (ii) la validation des références géodésiques et des séries temporelles de niveaux des mers avec des données et des modèles exogènes. Les données utilisées sont illustrées en *Figure 6*. Pour les références, nous utiliserons les données classiquement utilisées dans les traitements de géodésie spatiale et disponibles via les services internatio-

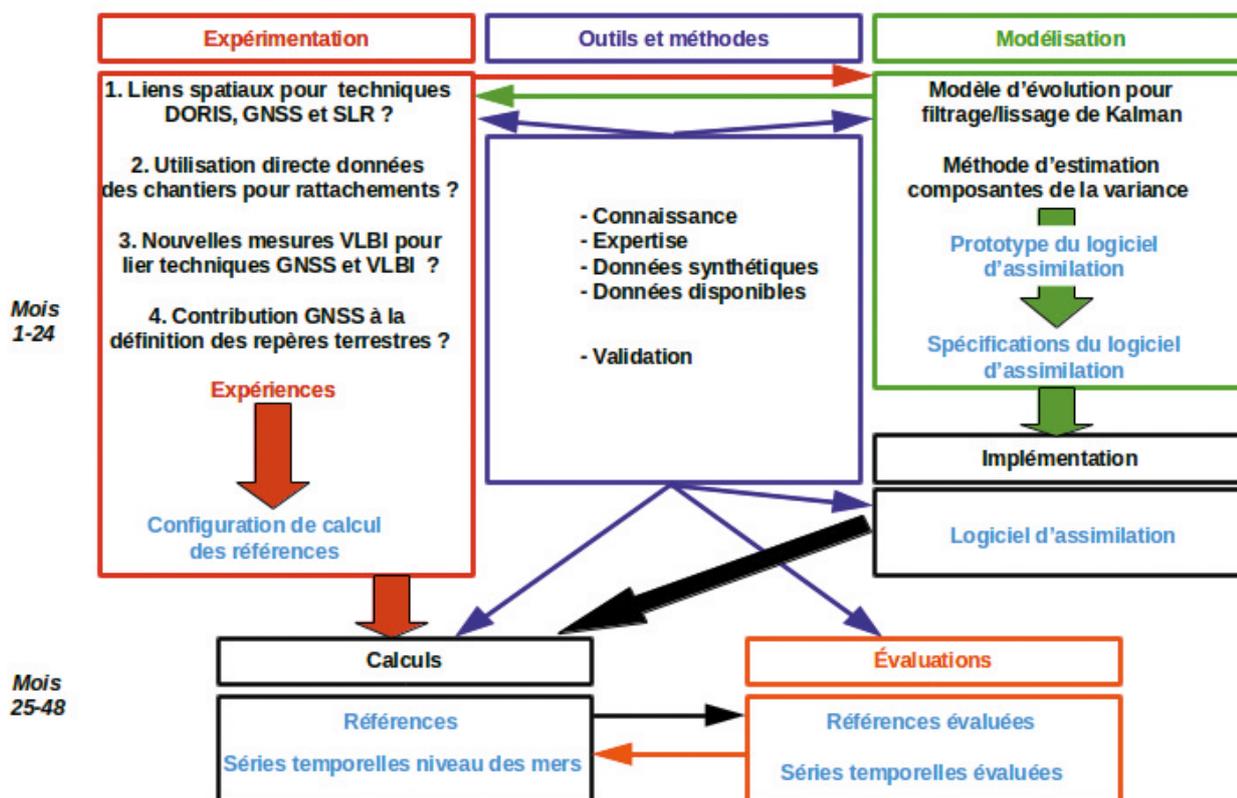


Figure 5. Étapes du projet GEODESIE sur 2017-2020 (Coulot et al., 2017).



Figure 6. Données utilisées pour le projet GEODESIE – adaptation de Coulot et al. (2017).

► naux des techniques (IDS¹¹, IGS¹², IVS¹³ et ILRS¹⁴), avec une attention particulière portée aux liens entre les techniques, au sol ou dans l'espace. Pour le calcul des séries temporelles de niveaux de mer, nous utiliserons les données des satellites altimétriques et les enregistrements des marégraphes, et les calculs seront respectivement effectués (i) au LEGOS (Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales, www.legos.obs-mip.fr), en collaboration avec CLS (Collecte localisation satellites, www.cls.fr) et en lien avec AVISO+ (www.aviso.altimetry.fr), et (ii) au LIENSs (Littoral, environnement et sociétés, lienss.univ-larochelle.fr) de l'Université de La Rochelle, en lien avec le service PSMSL (*Permanent Service for Mean Sea Level*, www.psmsl.org) et le centre de données SONEL (Système d'observation du niveau des eaux littorales, www.sonel.org), dans le cadre du programme GLOSS (*Global Sea Level Observing System*, www.gloss-sealevel.org).

Enfin, ce projet a été pensé comme le premier d'une série. En effet, pour atteindre les objectifs ambitieux fixés par GGOS, nous aurons besoin, dans un futur proche, d'assimiler de plus en plus de données diverses (telles que des données InSAR – *Interferometric Synthetic-Aperture Radar*, par exemple, cf. le bas de la Figure 6) dans des systèmes de plus en plus complexes, pour estimer des références de plus en plus exactes. Nous espérons également voir le lancement du satellite E-GRASP (le logo de la mission est visible dans la Figure 6) à l'horizon 2025, et notre logiciel sera alors prêt pour en assimiler les données !

laboratoires différents : à l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière, www.ign.fr), Bruno Garayt (SGN, Service de géodésie et de nivellement), David Coulot, Laurent Métivier, Samuel Nahmani, Arnaud Pollet, Paul Rebischung (LAREG, équipe de recherche en géodésie du LaSTIG, Laboratoire des sciences et technologies de l'information géographique, située dans l'Université Paris Diderot, recherche.ign.fr/labos/lareg), Xavier Collilieux, Franck Tertre (ENSG, École nationale des sciences géographiques, www.ensg.eu) ; à l'Observatoire de Paris/PSL (Paris sciences et Lettres), Christian Bizouard, Pascal Bonnefond, Sébastien Bouquillon, Sébastien Lambert, Jean-Yves Richard (laboratoire SYRTE, Systèmes de référence temps-espace, syрте.obsmpm.fr), Florent Deleflie (IMCCE, Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides, www.imcce.fr) ; au CNES/GET (Centre national d'études spatiales/Géosciences Environnement Toulouse, www.get.obs-mip.fr), Richard Biancale, Julien Laurent-Varin, Jean-Michel Lemoine, Jean-Charles Marty, Flavien Mercier, Félix Perosanz, Franck Reinquin ; au

Équipe du projet

Les logos du projet et des différents établissements/laboratoires dont sont issus les participants du projet sont donnés en Figure 7. Le projet met actuellement en collaboration 23 personnes de six établissements/

11 *International DORIS Service*, <https://ids-doris.org>.

12 *International GNSS Service*, www.igs.org.

13 *International VLBI Service for Geodesy & Astrometry*, <https://ivscc.gsfc.nasa.gov>.

14 *International Laser Ranging Service*, <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov>.



Figure 7. Logos du projet et des différents établissements/laboratoires participant au projet.

CNES/LEGOS, Benoit Meyssignac ; à l'Université de La Rochelle/LIENSs (Littoral, environnement et sociétés, lienss.univ-larochelle.fr), Guy Wöppelmann. L'équipe du projet sera renforcée en novembre, avec l'arrivée de Vladimir Schott Guilmault en thèse au LAREG. Un/e post-doctorant/e viendra également renforcer l'équipe en 2019-2020 pour le calcul et la validation des références géodésiques et des séries temporelles de niveaux des mers (cf. section "Grandes étapes du projet"). Des collaborations avec d'autres laboratoires du GRGS seront mises en place, si besoin est, au cours du projet. ●

Contact

David COULOT

coordinateur du projet GEODESIE ; chargé de recherche, LASTIG LAREG, IGN, ENSG, Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité ; chercheur affilié, IMCCE, Observatoire de Paris, Université de recherche PSL, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06 ; David.Coulot@ign.fr

Nous suivre

Le site Internet du projet (geodesie_anr.ign.fr) sera ouvert à la fin de l'été 2017. Vous pouvez également suivre le compte du projet sur Twitter : @GEODESIE_ANR.

Remerciements

Le projet GEODESIE est le projet ANR-16-CE01-0001 de l'ANR (cf. www.agence-nationale-recherche.fr/?Project=ANR-16-CE01-0001). L'équipe du projet remercie l'ANR pour le financement de ce dernier. Elle remercie aussi le CNES pour son soutien aux activités d'analyse de données spatiales et à la préparation de la mission E-GRASP, par le financement des propositions de

recherche scientifique portées par le GRGS. David Coulot tient également à remercier Christiane Guillaureau-Zahra, Marie-Claude Foubert, Patrick Bouron et David Correia (IGN) pour leur aide pour la gestion et le suivi du projet. Il remercie enfin Thomas Sandri (IGN, de mai 2016 à mai 2017, puis CNRS, Centre national de la recherche scientifique, de juin à août 2017) pour sa contribution précieuse au développement du prototype du logiciel de traitements des données spatiales avec un noyau de filtrage/lissage de Kalman et aux premiers tests numériques effectués dans le cadre du projet.

Bibliographie

Ablain, M., Legeais, J.F., Prandi, P., Marcos, M., Fenoglio-Marc, L., Dieng, H.B., Benveniste, J., Cazenave, A. (2017) *Satellite Altimetry-Based Sea Level at Global and Regional Scales*. *Surveys in Geophysics*, 38(1): 7-31, doi: 10.1007/s10712-016-9389-8.

Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., Collilieux, X. (2016) *ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions*. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 121, doi: 10.1002/2016JB013098.

Beckley, B., Lemoine, F., Zelensky, N., Ray, R., Mitchum, G., Yang, X., Ricko, M., Vandemark, D., Feng, H. (2016) *Assessment of the Jason-3 extension to the Topex/Poseidon/Jason sea surface height climate data record referenced to ITRF2014*. Oral presentation, OSTST Meeting, 31 October-4 November 2016, La Rochelle, France.

Biancale, R. (2011) *Status, results, challenges of the Combination on the Observation Level (COL)*. Oral presentation, 3rd GGOS Unified Analysis Workshop, 16-17 September 2011, Zürich, Switzerland.

Bonnefond, P., Haines, B.J., Watson, C. (2011) *In situ Absolute Calibration and Validation: A Link from Coastal to Open-*

Ocean Altimetry. Coastal Altimetry, pp. 259-296, S. Vignudelli et al. (eds.), Springer-Verlag, doi: 10.1007/978-3-642-12796-0_11.

Boucher, C. (2015) *Méthodes intégrées de traitements des données pour les systèmes globaux d'observation géodésique de la Terre*. Présentation orale, Journée "Assimilation de données en géosciences", 21 mai 2015, Saint-Mandé, France, cnfgg.eu/php/par_assimilation.php.

Cazenave, A. (2017) *Niveau de la mer, du global au local, observation et causes*. Présentation orale, 2^e colloque de restitution du TOSCA, 21 et 22 mars 2017, Paris, France, www.servco.com/tosca2017/11_cazenave_presentation.pdf.

Church, J.A., et al. (2013) *Sea level change*. IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis, chap. 13, T.F. Stocker et al. (eds), Cambridge Univ. Press, Cambridge U.K., and New York.

Collilieux, X., Wöppelmann, G. (2011) *Global sea-level rise and its relation to the terrestrial reference frame*. *Journal of Geodesy*, 85: 9-22, doi: 10.1007/s00190-010-0412-4.

Coulot, D. (2005) *Télemétrie laser sur satellites et combinaison de techniques géodésiques. Contributions aux systèmes de référence terrestres et applications*.

Thèse de doctorat, Dynamique des systèmes gravitationnels, Observatoire de Paris, recherche.ign.fr/labos/lareg/pdf/Theses/these_david_coulot_2005.pdf.

Coulot, D. (2015) *GRASP : une mission spatiale dédiée à l'amélioration de la qualité du repère de référence terrestre*. Présentation orale, Journée commémorative des 30 ans de la première réalisation du système international de référence terrestre par géodésie spatiale, 17 juin 2015, Saint-Mandé, France.

Coulot, D., et l'équipe du projet GEODESIE (2017) *Projet ANR GEODESIE : assimilation de données géodésiques et estimation de références pour l'étude du changement climatique*. Présentation orale, Journées de la Recherche de l'IGN, 23 et 24 mars 2017, Marne la Vallée, France, recherche.ign.fr/jr/jr17/presentations/Presentation_D_Coulot_et_al_24_03_17_matin.pdf.

Dangendorf, S., Marcos, M., Wöppelmann, G., Conrad, C.P., Frederikse, T., Riva, R. (2017) *Reassessment of 20th century global mean sea level rise*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(23): 5946-5951, doi: 10.1073/pnas.1616007114.

- Dieng, H.B., Cazenave, A., Meyssignac, B., Ablain, M. (2017) *New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach*. Geophysical Research Letters, 44: 3744-3751, doi: 10.1002/2017GL073308.
- Haines, B.J., Bar-Sever, Y.E., Bertiger, W.I., Desai, S.D., Harvey, N., Sibois, A.E., Weiss, J.P. (2015) *Realizing a terrestrial reference frame using the Global Positioning System*. Journal of Geophysical Research, Solid Earth, 120, doi: 10.1002/2015JB012225.
- Herring, T.A., David, J.L., Shapiro, I.I. (1990) *Geodesy by Radio Interferometry: The Application of Kalman Filtering to the Analysis of Very Long Baseline Interferometry Data*. Journal of Geophysical Research, 95(B8): 12,561-12,581.
- Kuang, D., Bar-Sever, Y., Haines, B. (2015) *Analysis of orbital configurations for geocenter determination with GPS and low-Earth orbiters*. Journal of Geodesy, 89: 471-481, doi: 10.1007/s00190-015-0792-6.
- Kwak, Y., Cho, J., Kondo, T., Takiguchi, H., Amagai, J., Gotoh, T., Sekido, M., Ichikawa, R., Kim, T., Sasao, T. (2012) *A Comparison of Broadcast and Final Orbits on GPS Delays in GPS-VLBI Hybrid Observation*. Journal of Korean GNSS Society, 1(1): 65-75, doi: 10.11003/JKGS.2012.1.1.065.
- Jevrejeva, S., Moore, J.C., Grinsted, A., Matthews, Spada, G. (2014) *Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807*. Global and Planetary Change, 113: 11-22, doi: 10.1016/j.gloplacha.2013.12.004.
- Marty, J.C., Loyer, S., Perosanz, F., et al. (2011) *GINS: the CNES/GRGS GNSS scientific software*. ESA Proceedings WPP326, 31 August-2 September 2011, Copenhagen, Denmark.
- Meyssignac, B., Cazenave, A. (2012) *Sea level: A review of present-day and recent-past changes and variability*. Journal of Geodynamics, 58: 96-109, doi: 10.1016/j.jog.2012.03.005.
- Meyssignac, B., Becker, M., Llovel, W., Cazenave, A. (2012) *An Assessment of Two-Dimensional Past Sea Level Reconstructions Over 1950-2009 Based on Tide-Gauge Data and Different Input Sea Level Grids*. Surveys in Geophysics, 33: 945-972, doi: 10.1007/s10712-011-9171-x.
- Meyssignac, B. (2016) *Les variations actuelles du niveau de la mer en réponse au changement climatique*. Présentation orale, Journées REF MAR, 2-4 février 2016, Paris, France, refmar.shom.fr/documents/10227/429051/Benoit-Meyssignac_Journees-REFMAR-2016.pdf.
- Plag, H.P., Pearlman, M. (eds., 2009) *Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020*. Springer-Verlag, doi: 10.1007/978-3-642-02687-4.
- Plank, L., Hellerschmied, A., McCallum, J., Böhm, J., Lovell, J. (2017) *VLBI observations of GNSS-satellites: from scheduling to analysis*. Journal of Geodesy, 91: 867-880, doi: 10.1007/s00190-016-0992-8.
- Pollet, A. (2011) *Combinaison de techniques de géodésie spatiale. Contributions aux réalisations des systèmes de référence et à la détermination de la rotation de la Terre*. Thèse de doctorat, Dynamique des systèmes gravitationnels, Observatoire de Paris, recherche.ign.fr/labos/lareg/pdf/Theses/these_arnaud_pollet_2011.pdf.
- Pollet, A., Coulot, D., Deleflie, F., Capderou, M., Biancale, R., Mande, M. (2015) *Application d'algorithmes génétiques à la détermination d'orbites optimales pour GRASP*. Revue XYZ, 144 : 44-52.
- Pollet, A., Coulot, D., Biancale, R. (2017) *Projet de mission E-GRASP : simulations numériques du Groupe de recherche de géodésie spatiale*. Présentation orale, Journées de la Recherche de l'IGN, 23 et 24 mars 2017, Marne-la-Vallée, France, recherche.ign.fr/jr/jr17/presentations/Presentation_A_Pollet_et_al_24_03_17_matin.pdf.
- Reibischung, P., Altamimi, Z., Springer, T. (2014) *A collinearity diagnosis of the GNSS geocenter determination*. Journal of Geodesy, 88(1): 65-85, doi: 10.1007/s00190-013-0669-5.
- Sarti, P., Sillard, P., Vittuari, L. (2004) *Surveying co-located space-geodetic instruments for ITRF computation*. Journal of Geodesy, 78: 210-222, doi: 10.1007/s00190-004-0387-0.
- Simon, D. (2006) *Optimal State Estimation. Kalman, H ∞ , and Nonlinear Approaches*. John Wiley & Sons, Inc., Wiley-Interscience.
- Thaller, D., Roggenbuck, O., Sosnica, K., Mareyen, M., Dach, R., Jäggi, A. (2013) *Validation of GNSS-SLR local ties by using space ties*. Oral presentation, IERS Workshop on Local Surveys and Co-locations, 21-22 May 2013, Paris, France, iersworkshop2013.ign.fr/docs/session6/thaller_WScolocation2013.pdf.
- Wu, X., Collilieux, X., Altamimi, Z., Vermeersen, B.L.A., Gross, R.S., Fukumori, I. (2011) *Accuracy of the International Terrestrial Reference Frame origin and Earth expansion*. Geophysical Research Letters, vol 38, L13304, doi: 10.1029/2011GL047450.
- Wu, X., Abbondanza, C., Altamimi, Z., Chin T.M., Collilieux, X., Gross, R.S., Hefflin, M.B., Jiang, Y., Parker, J.W. (2015) *KALREF - A Kalman filter and time series approach for the International Terrestrial Reference Frame realization*. Journal of Geophysical Research, Solid Earth, 120: 3775-3802, doi: 10.1002/2014JB011622.
- Wöppelmann, G., Marcos, M. (2016) *Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability*. Reviews of Geophysics, 54: 1-29, doi: 10.1002/2015RG000502.
- Yaya, P. (2002) *Combinaisons de techniques d'astrométrie et de géodésie spatiale. Apport à l'estimation des paramètres d'orientation de la Terre*. Thèse de doctorat, Dynamique des systèmes gravitationnels, Observatoire de Paris, hpiers.obspm.fr/combinaison/documentation/thesis/These_Philippe_Yaya.pdf.
- Zoulida, M. (2016) *Determination of terrestrial frames by optimal combination of GNSS, DORIS and SLR measurements*. Thèse de doctorat, Institut de physique du globe de Paris, recherche.ign.fr/labos/lareg/pdf/Theses/these_myriam_zoulida_2016.pdf.
- Zoulida, M., Pollet, A., Coulot, D., Perosanz, F., Loyer, S., Biancale, R., Reibischung, P. (2016) *Multi-technique combination of space geodesy observations: Impact of the Jason-2 satellite on the GPS satellite orbits estimation*. Advances in Space Research, 58: 1376-1389, doi: 10.1016/j.asr.2016.06.019.

ABSTRACT

The GEODESIE project aims at determining highly-accurate global and consistent geodetic references (time series of terrestrial and celestial frames, of Earth orientation parameters, and orbits of Earth's observation satellites), with an optimal reprocessing of all the space-geodetic data available since the early 1980's. The geophysical and climate research communities will have access to these references, for a better estimation of sea level rise, ice mass balance and on-going climate changes. Time series of geocentric sea levels, computed from altimetric data and tide gauge records with these references, will also be provided after the end of the project.