



INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE

Projet ANR GEODESIE : Assimilation de données géodésiques et estimation de références pour l'étude du changement climatique



David Coulot^{1,2} et l'équipe du projet GEODESIE

¹ LASTIG LAREG, IGN, ENSG, Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Paris

² IMCCE, Observatoire de Paris, PSL Research University, Paris

université
PARIS
DIDEROT
PARIS 7



GEODESIE



l'Observatoire
de Paris | *imcce*

Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides

PSL 
RESEARCH UNIVERSITY PARIS



INFORMATIONS DIVERSES

- **GEODESIE : GEOdetic Data assimilation and EStimation of references for climate change InvEstigation**
- **Projet soumis en réponse à l'appel à projets générique 2016 de l'Agence Nationale de la Recherche, dans le défi "Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique" et dans l'instrument de financement Jeune Chercheuse Jeune Chercheur.**
- **Aide de l'ANR sur quatre ans (2017-2020) avec un établissement partenaire unique, l'IGN.**
- **Site Internet bientôt en ligne (d'ici l'été) via ForM@Ter. **
- **Pour nous suivre sur Twitter : @GEODESIE_ANR . **

PLAN

- ÉQUIPE PROJET
- OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES
- GRANDES ÉTAPES DU PROJET
- RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES POUR LE FILTRAGE

ÉQUIPE PROJET



ÉQUIPE PROJET

IGN

INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE

B. Garayt

Renforts IGN

C. Guillerau-Zahra,
M.-C. Foubert,
P. Bouron, D. Correia,
T. Sandri (jusque fin mai)



D. Coulot, L. Métivier, S. Nahmani,
A. Pollet, P. Rebschung

ENSG
Géomatique

X. Collilieux, F. Tertre

ÉCOLE NATIONALE
DES SCIENCES
GÉOGRAPHIQUES



GÉOSCIENCES
ENVIRONNEMENT
TOULOUSE



R. Biancale, J. Laurent-Varin, J.-M. Lemoine,
J.-C. Marty, F. Mercier, F. Perosanz,
F. Reinquin



Systèmes de Référence Temps-Espace

C. Bizouard, P. Bonnefond, S. Bouquillon,
S. Lambert, J.-Y. Richard



Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides

F. Deleflie



B. Meyssignac



G. Wöppelmann

23 personnes – six établissements/laboratoires

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (1/7)

■ CONTEXTE



- IERS. Trois centres de produit officiels ICRF, ITRF et EOP en France.



OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (1/7)

■ CONTEXTE



- IERS. Trois centres de produit officiels ICRF, ITRF et EOP en France.



- GRGS. Travaux sur la combinaison directe des mesures des techniques depuis le début des années 2000 (Yaya, 2002 ; Coulot, 2005 ; Pollet, 2011 ; Zoulida, 2016). Centres d'analyse pour les cinq techniques (DORIS, GNSS, LLR, SLR, VLBI) et centre de combinaison GNSS.



OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (1/7)

■ CONTEXTE



- IERS. Trois centres de produit officiels ICRF, ITRF et EOP en France.



- GRGS. Travaux sur la combinaison directe des mesures des techniques depuis le début des années 2000 (Yaya, 2002 ; Coulot, 2005 ; Pollet, 2011 ; Zoulida, 2016). Centres d'analyse pour les cinq techniques (DORIS, GNSS, LLR, SLR, VLBI) et centre de combinaison GNSS.



- Niveau des mers. Experts français mondialement reconnus. Établissement national qui est acteur majeur dans le domaine de l'hydrographie et de l'océanographie.



OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (1/7)

■ CONTEXTE



- IERS. Trois centres de produit officiels ICRF, ITRF et EOP en France.



- GRGS. Travaux sur la combinaison directe des mesures des techniques depuis le début des années 2000 (Yaya, 2002 ; Coulot, 2005 ; Pollet, 2011 ; Zoulida, 2016). Centres d'analyse pour les cinq techniques (DORIS, GNSS, LLR, SLR, VLBI) et centre de combinaison GNSS.



- Niveau des mers. Experts français mondialement reconnus. Établissement national qui est acteur majeur dans le domaine de l'hydrographie et de l'océanographie.



- Pôle de recherche sur les systèmes de référence terrestres. Créé par C. Boucher. Axe de recherche innovant sur l'assimilation de données. Journée CNES – CNFGG – IGN en mai 2015 (cf. cnfgg.eu/php/par_assimilation.php).

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (1/7)

■ CONTEXTE



- IERS. Trois centres de produit officiels ICRF, ITRF et EOP en France.



- GRGS. Travaux sur la combinaison directe des mesures des techniques depuis le début des années 2000 (Yaya, 2002 ; Coulot, 2005 ; Pollet, 2011 ; Zoulida, 2016). Centres d'analyse pour les cinq techniques (DORIS, GNSS, LLR, SLR, VLBI) et centre de combinaison GNSS.

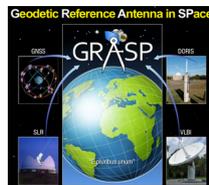


- Niveau des mers. Experts français mondialement reconnus. Établissement national qui est acteur majeur dans le domaine de l'hydrographie et de l'océanographie.



- Pôle de recherche sur les systèmes de référence terrestres. Créé par C. Boucher. Axe de recherche innovant sur l'assimilation de données. Journée CNES – CNFGG – IGN en mai 2015 (cf. cnfgg.eu/php/par_assimilation.php).

- Forte implication du GRGS dans la préparation des missions GRASP et E-GRASP.



OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (2/7)



- PRÉSENTATION B. MEYSSIGNAC – JOURNÉES REFMAR 2016
- PRÉSENTATION A. CAZENAVE – COLLOQUE TOSCA 2017



- Niveau de la mer actuel augmente rapidement en comparaison aux millénaires précédents, en réponse au réchauffement de l'océan et à la fonte des glaces continentales (1.7 ± 0.3 mm/an sur le 20^{ème} siècle, 3.0 ± 0.4 mm/an sur l'ère altimétrique – depuis 1993). Accélération : 2.7 mm/an sur 1993-2004 ; 3.5 mm/an sur 2004-2015.

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (2/7)



- PRÉSENTATION B. MEYSSIGNAC – JOURNÉES REFMAR 2016
- PRÉSENTATION A. CAZENAVE – COLLOQUE TOSCA 2017



- Niveau de la mer actuel augmente rapidement en comparaison aux millénaires précédents, en réponse au réchauffement de l'océan et à la fonte des glaces continentales (1.7 ± 0.3 mm/an sur le 20^{ème} siècle, 3.0 ± 0.4 mm/an sur l'ère altimétrique – depuis 1993). Accélération : 2.7 mm/an sur 1993-2004 ; 3.5 mm/an sur 2004-2015.
- Hausse du niveau des mers est un des meilleurs indicateurs du changement climatique global (réponse intégrée aux changements de température, glaces, eaux continentales).

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (2/7)



- PRÉSENTATION B. MEYSSIGNAC – JOURNÉES REFMAR 2016
- PRÉSENTATION A. CAZENAVE – COLLOQUE TOSCA 2017



- Niveau de la mer actuel augmente rapidement en comparaison aux millénaires précédents, en réponse au réchauffement de l'océan et à la fonte des glaces continentales (1.7 ± 0.3 mm/an sur le 20^{ème} siècle, 3.0 ± 0.4 mm/an sur l'ère altimétrique – depuis 1993). Accélération : 2.7 mm/an sur 1993-2004 ; 3.5 mm/an sur 2004-2015.
- Hausse du niveau des mers est un des meilleurs indicateurs du changement climatique global (réponse intégrée aux changements de température, glaces, eaux continentales).
- Enjeux sociétaux : risques de submersion, phénomènes d'érosion, intrusion d'eau salée dans les eaux de surface, et, plus généralement, tous les risques induits par le changement climatique.

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (2/7)



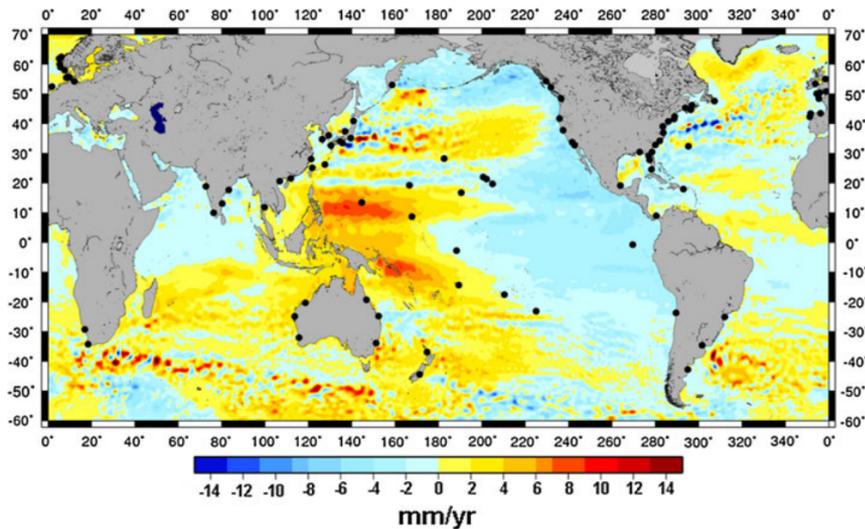
- PRÉSENTATION B. MEYSSIGNAC – JOURNÉES REFMAR 2016
- PRÉSENTATION A. CAZENAVE – COLLOQUE TOSCA 2017



- Niveau de la mer actuel augmente rapidement en comparaison aux millénaires précédents, en réponse au réchauffement de l'océan et à la fonte des glaces continentales (1.7 ± 0.3 mm/an sur le 20^{ème} siècle, 3.0 ± 0.4 mm/an sur l'ère altimétrique – depuis 1993). Accélération : 2.7 mm/an sur 1993-2004 ; 3.5 mm/an sur 2004-2015.
- Hausse du niveau des mers est un des meilleurs indicateurs du changement climatique global (réponse intégrée aux changements de température, glaces, eaux continentales).
- Enjeux sociétaux : risques de submersion, phénomènes d'érosion, intrusion d'eau salée dans les eaux de surface, et, plus généralement, tous les risques induits par le changement climatique.
- Hausse globale cohérente avec les modèles des contributions majeures (expansion thermique, contribution des glaciers, des calottes polaires, des variations du stock d'eau sur les continents) mais variations régionales pas encore complètement expliquées.
 - *Surveillance long-terme du niveau de la mer et de ses contributeurs.*
 - *Réduction des incertitudes sur les déterminations du niveau de la mer et estimation de ses contributeurs mineurs.*

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (3/7)

■ RÉFÉRENCES GÉODÉSIQUES ET NIVEAU DES MERS



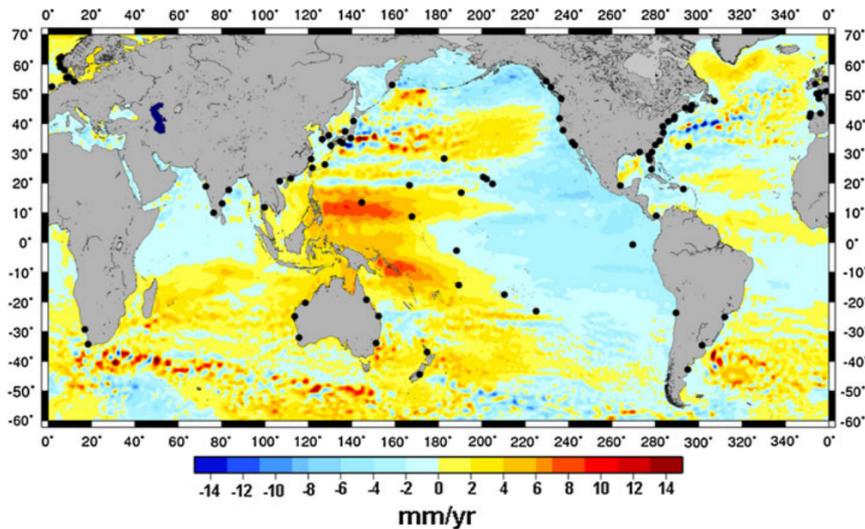
Variations spatiales des tendances dans les séries de niveau des mers calculées à partir des données d'altimétrie satellitaire.

Une tendance globale de 3.2 mm/an a été enlevée.

Les points noirs matérialisent les positions de certains marégraphes. [Meysignac et al., 2012]

OBJECTIFS ET VEROUS SCIENTIFIQUES (3/7)

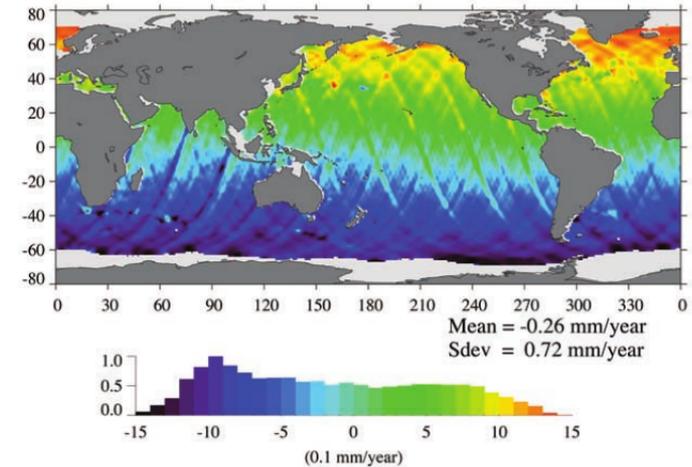
■ RÉFÉRENCES GÉODÉSIQUES ET NIVEAU DES MERS



Variations spatiales des tendances dans les séries de niveau des mers calculées à partir des données d'altimétrie satellitaire.

Une tendance globale de 3.2 mm/an a été enlevée.

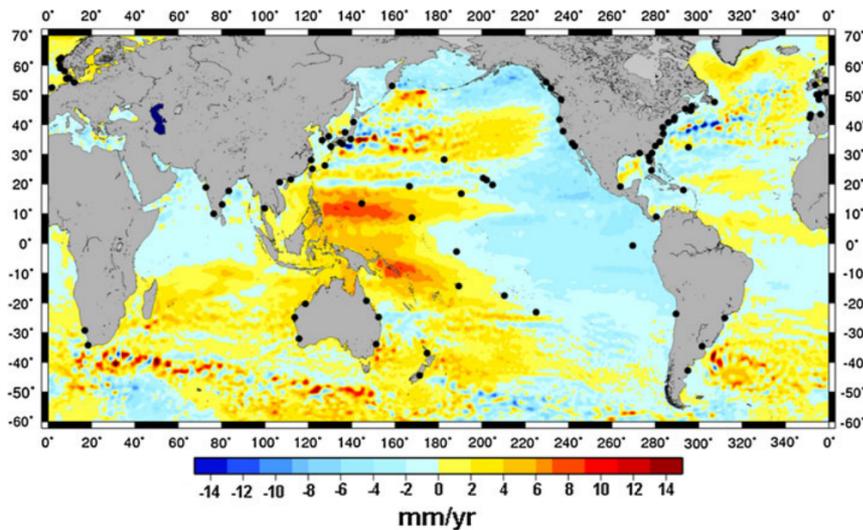
Les points noirs matérialisent les positions de certains marégraphes. [Meyssignac et al., 2012]



Différences (0.1 mm/an) entre les tendances dans les séries de niveau des mers, calculées à partir des données de TOPEX (1993-2002), avec des orbites respectivement compatibles avec l'ITRF2005 et avec l'ITRF2000 (dérive de 1.8 mm/an en Z entre ITRF2005 et ITRF2000). [Beckley et al., 2007]

OBJECTIFS ET VEROUS SCIENTIFIQUES (3/7)

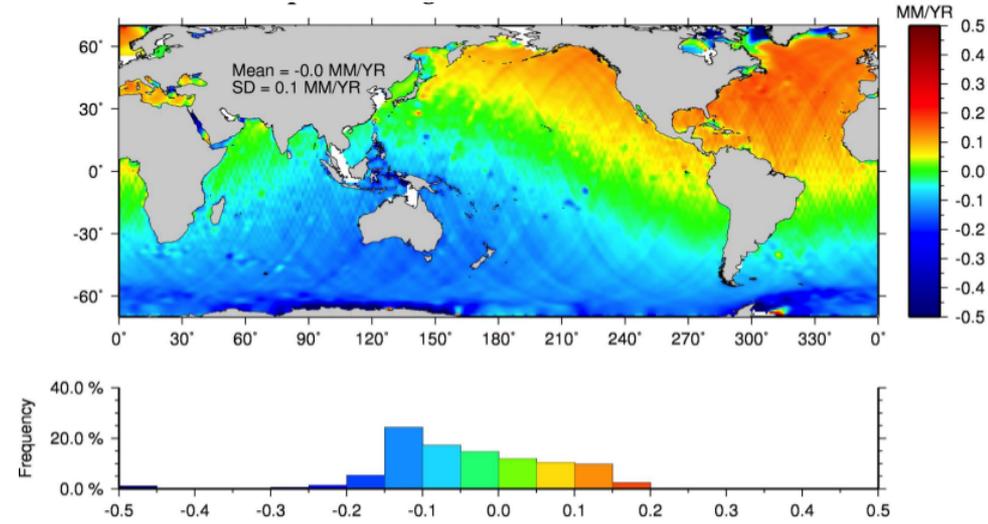
■ RÉFÉRENCES GÉODÉSIQUES ET NIVEAU DES MERS



Variations spatiales des tendances dans les séries de niveau des mers calculées à partir des données d'altimétrie satellitaire.

Une tendance globale de 3.2 mm/an a été enlevée.

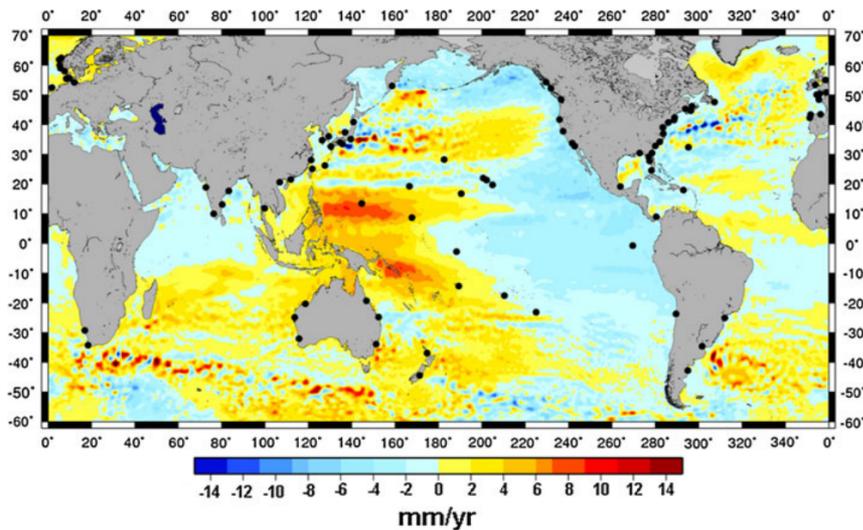
Les points noirs matérialisent les positions de certains marégraphes. [Meysignac et al., 2012]



Impact sur les déterminations des niveaux des mers régionaux de la transition de l'ITRF2008 vers l'ITRF2014. [Beckley et al., 2016]

OBJECTIFS ET VEROUS SCIENTIFIQUES (3/7)

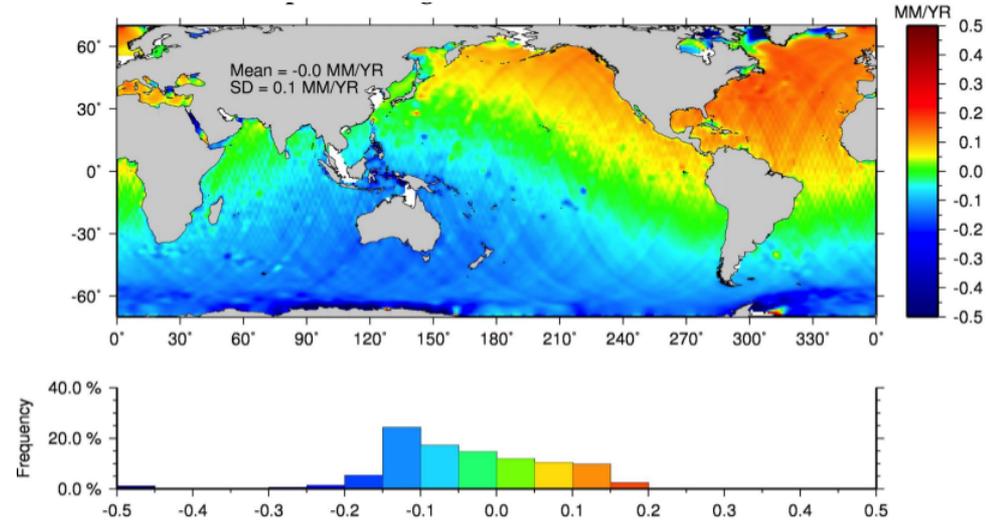
■ RÉFÉRENCES GÉODÉSIQUES ET NIVEAU DES MERS



Variations spatiales des tendances dans les séries de niveau des mers calculées à partir des données d'altimétrie satellitaire.

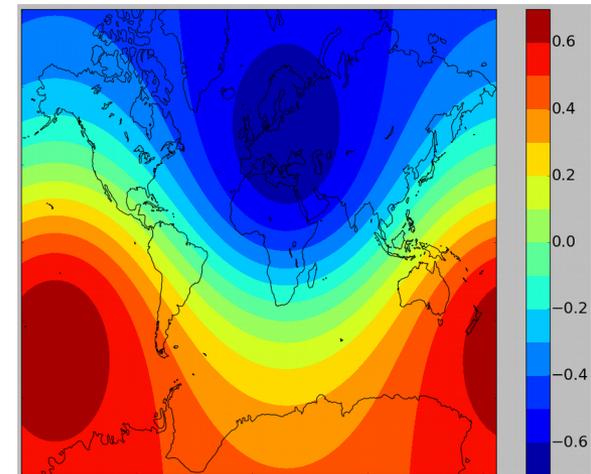
Une tendance globale de 3.2 mm/an a été enlevée.

Les points noirs matérialisent les positions de certains marégraphes. [Meysignac et al., 2012]



Impact sur les déterminations des niveaux des mers régionaux de la transition de l'ITRF2008 vers l'ITRF2014. [Beckley et al., 2016]

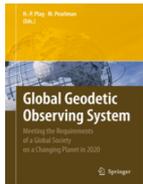
Erreurs dans les vitesses verticales (mm/an) calculées, à partir des erreurs dans les dérives de l'origine de l'ITRF2008 estimées par Wu et al. [2011], en suivant l'approche de Collilieux & Wöppelmann [2011].



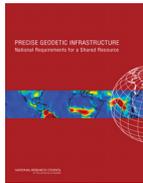
OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (4/7)

■ EXEMPLE : L'ITRF À L'HORIZON 2020

- “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].*



- “To achieve the GGOS program goals and support future high-precision geodetic science, the ITRF needs to be robust and stable over many decades. Future scientific objectives drive a target accuracy of 0.1 millimeters per year in the realization of the origin of the ITRF relative to the center of mass of the Earth system and 0.02 parts per billion per year (0.1 millimeters per year) in scale stability.” *[NRC, 2010].*



- **L'objectif est d'atteindre l'exactitude d'ensemble de 1 mm en position et 0.1 mm/an en vitesse (soit 1 mm sur 10 ans) requise pour répondre, non seulement aux enjeux concernant la surveillance et la connaissance de la forme et des mouvements de la Terre, mais aussi à nombre d'enjeux concernant le système Terre (surveillance du niveau des mers, de la fonte des glaces, etc.).** » *[CNES, 2014].*



- Exactitude et stabilité actuelles pas au niveau requis.

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (5/7)

■ RÉFÉRENCES GÉODÉSIQUES ET GÉOSCIENCES

- Exigence de qualité doit porter sur l'ensemble des références fournies par la géodésie (repères terrestre et céleste, paramètres d'orientation de la Terre – EOP, orbites des satellites, erreurs systématiques des techniques, etc.).

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (5/7)

■ RÉFÉRENCES GÉODÉSIQUES ET GÉOSCIENCES

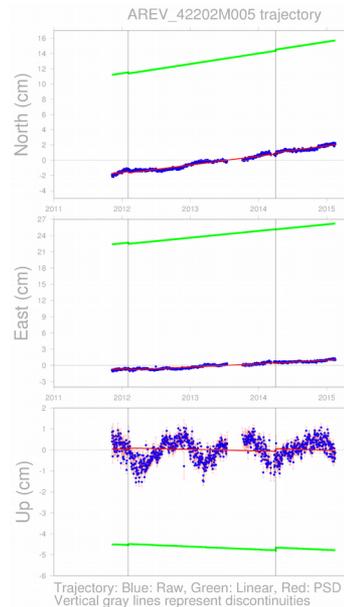
- Exigence de qualité doit porter sur l'ensemble des références fournies par la géodésie (repères terrestre et céleste, paramètres d'orientation de la Terre – EOP, orbites des satellites, erreurs systématiques des techniques, etc.).
- Enjeu majeur de surveillance du niveau des mers et de compréhension des phénomènes sous-jacents.



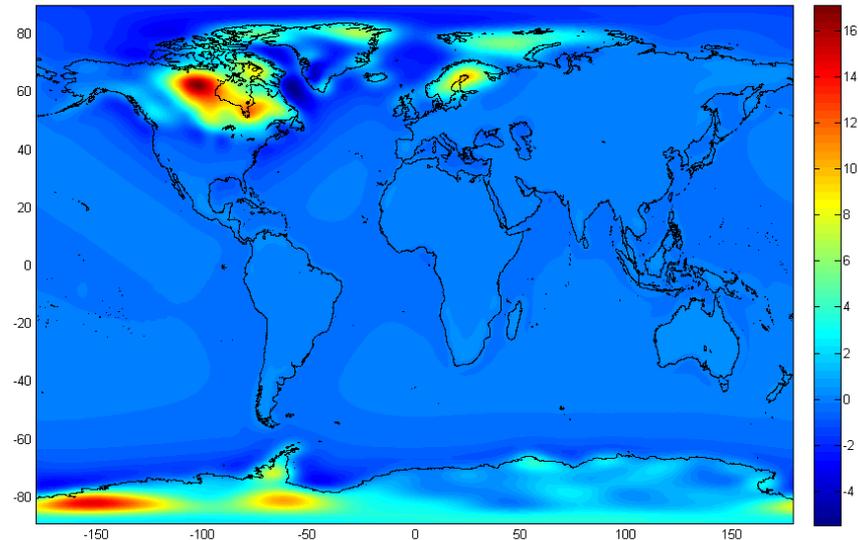
OBJECTIFS ET VEROUS SCIENTIFIQUES (5/7)

■ RÉFÉRENCES GÉODÉSIQUES ET GÉOSCIENCES

- Exigence de qualité doit porter sur l'ensemble des références fournies par la géodésie (repères terrestre et céleste, paramètres d'orientation de la Terre – EOP, orbites des satellites, erreurs systématiques des techniques, etc.).
- Enjeu majeur de surveillance du niveau des mers et de compréhension des phénomènes sous-jacents + enjeux importants en astronomie, géophysique, etc.



Séries temporelles (cm) de positions pour une station GPS (itrf.ign.fr).



Vitesse verticale actuelle du sol (mm/an) induite par le rebond postglaciaire, d'après le modèle ICE-5G.

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (6/7)

■ OBJECTIFS

- 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. Assimilation, avec une méthode spécifique, de toutes les données spatiales disponibles depuis l'avènement de la géodésie spatiale pour les cinq techniques (DORIS, GNSS, LLR, SLR et VLBI), prenant en compte tous les liens possibles entre ces techniques, et fournissant simultanément l'ensemble des références.

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (6/7)

■ OBJECTIFS

- 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. Assimilation, avec une méthode spécifique, de toutes les données spatiales disponibles depuis l'avènement de la géodésie spatiale pour les cinq techniques (DORIS, GNSS, LLR, SLR et VLBI), prenant en compte tous les liens possibles entre ces techniques, et fournissant simultanément l'ensemble des références.
- Fournir des références de grande qualité aux communautés de recherche en géophysique, océanographie, climat, astronomie et géodésie.

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (6/7)

■ OBJECTIFS

- 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. Assimilation, avec une méthode spécifique, de toutes les données spatiales disponibles depuis l'avènement de la géodésie spatiale pour les cinq techniques (DORIS, GNSS, LLR, SLR et VLBI), prenant en compte tous les liens possibles entre ces techniques, et fournissant simultanément l'ensemble des références.
- 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.

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (6/7)

■ OBJECTIFS

- 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. Assimilation, avec une méthode spécifique, de toutes les données spatiales disponibles depuis l'avènement de la géodésie spatiale pour les cinq techniques (DORIS, GNSS, LLR, SLR et VLBI), prenant en compte tous les liens possibles entre ces techniques, et fournissant simultanément l'ensemble des références.
- 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.

OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (6/7)

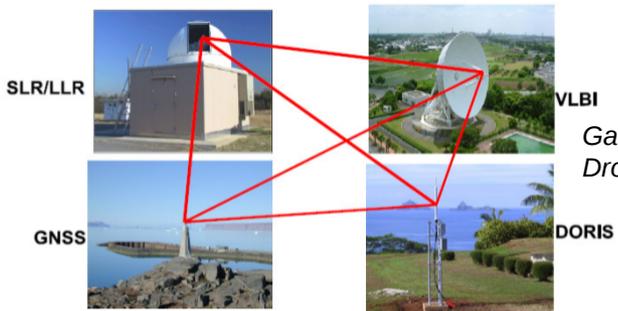
■ OBJECTIFS

- 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. Assimilation, avec une méthode spécifique, de toutes les données spatiales disponibles depuis l'avènement de la géodésie spatiale pour les cinq techniques (DORIS, GNSS, LLR, SLR et VLBI), prenant en compte tous les liens possibles entre ces techniques, et fournissant simultanément l'ensemble des références.
- 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.

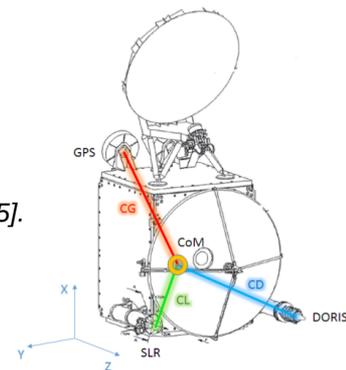
OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES (7/7)

■ VERROUS

- **Données spatiales.** Toutes les données spatiales depuis le le début des années 1980 jusqu'à fin 2016. Modèles et standards nécessaires sur toute la période.
- **Liens entre les techniques et définition des repères.** Utilisation des rattachements spatiaux (satellites dits « multi-techniques »). Utilisation directe des données des rattachements locaux au sol. Utilisation des nouveaux types de mesures VLBI/GNSS. Possible contribution des GNSS à la définition des repères terrestres.
- **Assimilation de données.** Quelle méthode ? Quel modèle stochastique ? Quelle pondération des données ?
- **Évaluation des références.** Validation des choix techniques et scientifiques par simulations. Évaluation des références avec des données et modèles exogènes.

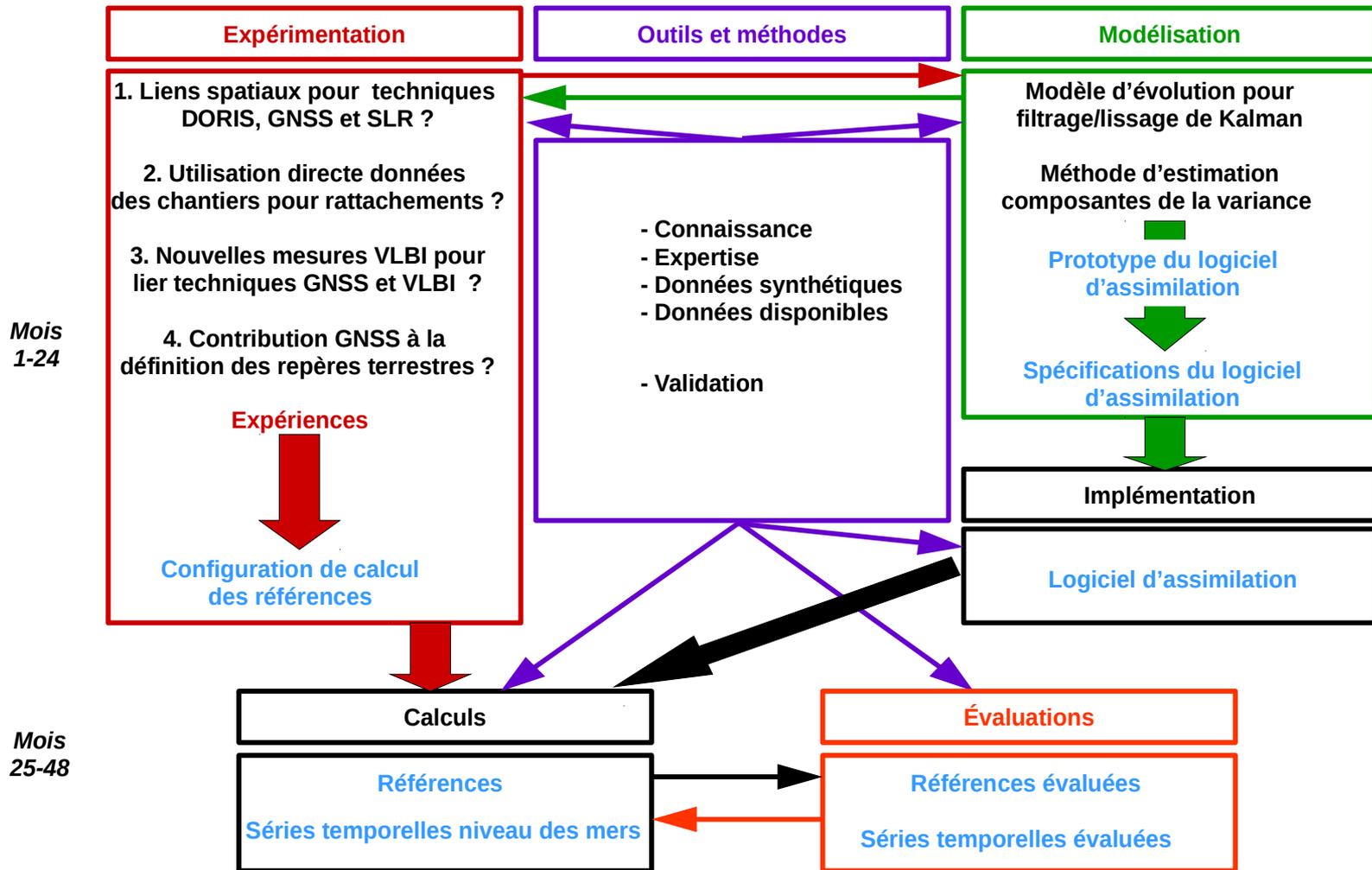


*Gauche : rattachement local [Altamimi, comm. pers., 2016].
Droite : rattachement spatial sur Jason-2 [Zoulida et al., 2015].*

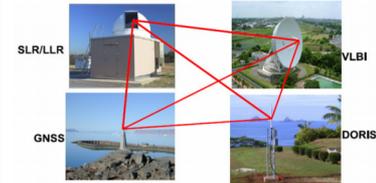


GRANDES ÉTAPES DU PROJET

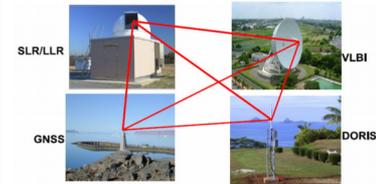
GRANDES ÉTAPES DU PROJET (1/2) – VUE GLOBALE



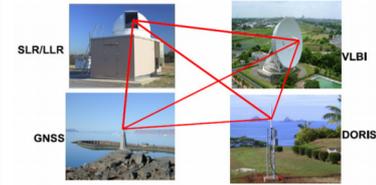
GRANDES ÉTAPES DU PROJET (2/2) - DONNÉES



GRANDES ÉTAPES DU PROJET (2/2) - DONNÉES



GRANDES ÉTAPES DU PROJET (2/2) - DONNÉES



RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES POUR LE FILTRAGE

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES POUR LE FILTRAGE (1/2)

■ CONTEXTE

- **Travaux de T. Sandri.** Réaliser un filtre de Kalman en surcouche de nos logiciels de traitements de données. Effectuer de premiers tests numériques sur données simulées, puis sur données réelles.
- **Télémétrie laser sur satellites.** Une des questions du projet : peut-on profiter du caractère séquentiel du filtre pour découpler biais en distance des stations au sol et corrections de centre optique à bord des satellites (décorrélation temporelle) ?



@ NERC SGF



LAGEOS @ NASA

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES POUR LE FILTRAGE (2/2)

■ PREMIERS RÉSULTATS

- **Validation du filtre.** Comparaisons logicielles et comparaison avec méthode des moindres carrés sur données simulées. Lissage en cours de validation.
- **Télémétrie laser sur satellites.** Sur données simulées sur un an (sans bruit), la décorrélation semble marcher (valeurs retrouvées au niveau du millimètre pour les biais et les corrections de centre optique).

■ TRAVAUX À VENIR

- **Télémétrie laser sur satellites.** Valider la décorrélation avec des données simulées sur plus de temps et avec du bruit de mesure et des instabilités à court-terme sur les biais en distance. Passer ensuite aux données réelles.
- **Combinaison.** Première étude de cas en collaboration avec le CNES-GET à Toulouse : combinaison/assimilation de l'ensemble des mesures spatiales sur un mois de données (données simulées et réelles). Utilisation du logiciel d'orbitographie GINS du CNES. Deux calculs : GINS/DYNAMO d'un côté et GINS/LOCOMOTIV-KFS de l'autre.

QUESTIONS

QUESTIONS ?

