

Nouveaux systèmes d'observation (GRASP)

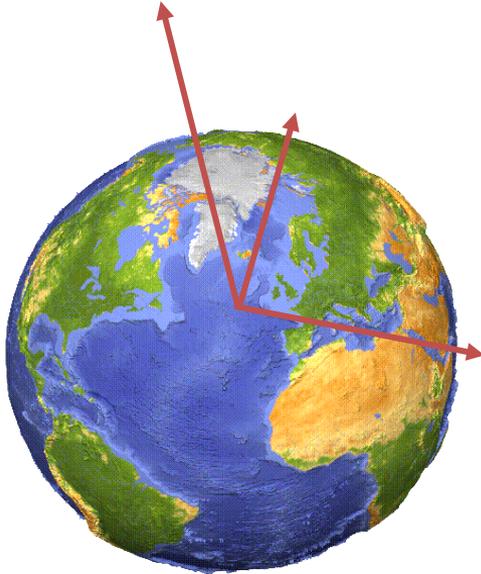
Nouvelle stratégie d'analyse des données (Projet ANR GEODESIE)

Journée scientifique du Bureau des longitudes
« Les systèmes d'observation géodésiques du futur »

A. Pollet & équipe du projet ANR GEODESIE

Notion de repère de référence terrestre (TRF)

Qu'est qu'un système de référence terrestre?

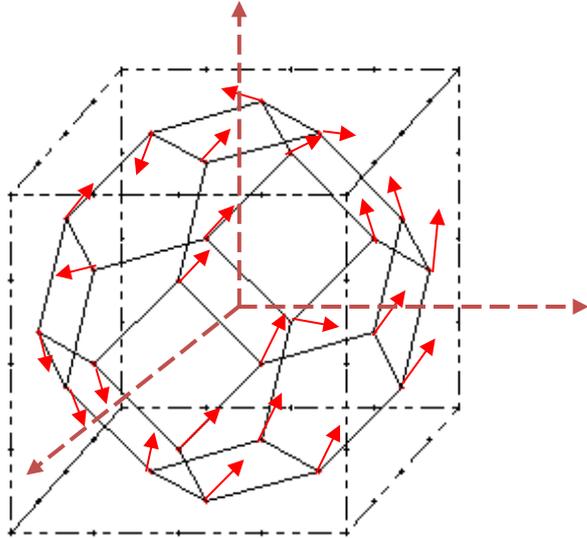


Système de référence terrestre :

- Concept purement mathématique
- Trièdre d'axes en co-rotation avec la Terre
- Une origine (trois translations)
- Une échelle (facteur d'homothétie)
- Une orientation (trois rotations)

Qu'est qu'un repère de référence terrestre?

Point de vue de la géodésie spatiale



Repère de référence terrestre :

- Table de coordonnées d'un ensemble de points
- Se positionner par rapport à ces points connus en coordonnées donne accès au système d'axes sous-jacent
- Origine = centre de gravité de la Terre

Repère de référence terrestre exact à 1 mm :

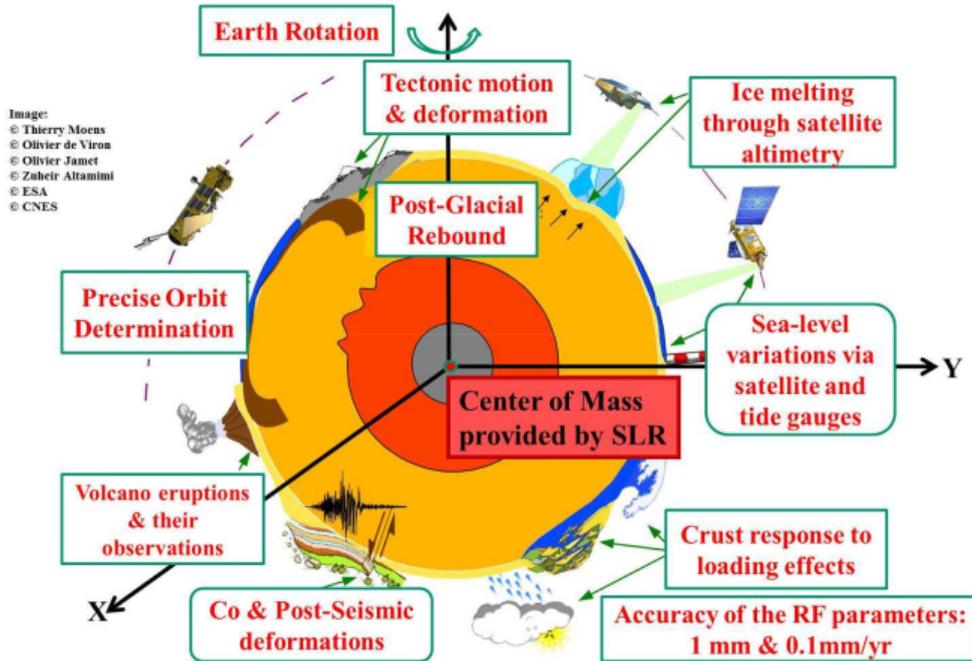
L'origine du repère est bien le centre des masses à 1mm près

Repère de référence terrestre stable à 0.1 mm/an :

Le repère estimé ne dérive pas dans le temps du repère vrai à plus de 0.1 mm/an

Géophysique et repère de référence

Géophysique et repère de référence terrestre

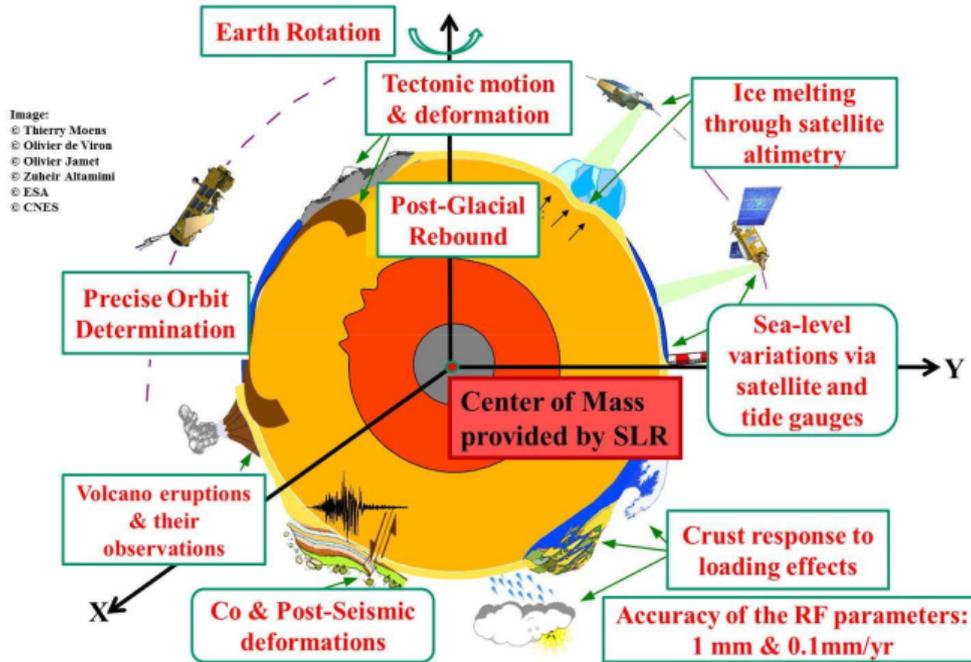


La Terre est un système dynamique complexe.

Les mesures de géodésie intègrent l'ensemble des phénomènes qui ont lieu en permanence dans ce système.

Le système Terre. Source : [Biancale et al., 2017].

Géophysique et repère de référence terrestre



La Terre est un système dynamique complexe.

Les mesures de géodésie intègrent l'ensemble des phénomènes qui ont lieu en permanence dans ce système.

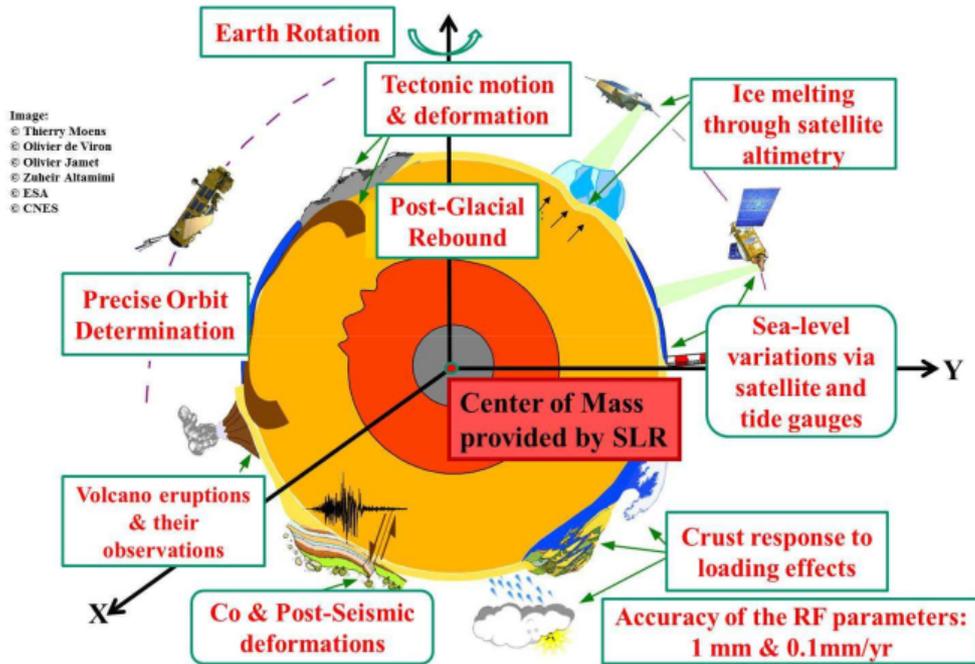
Le système Terre. Source : [Biancale et al., 2017].

Le repère géodésique global est de grande qualité et stable dans le temps.

C'est donc une référence indispensable pour étudier, dans l'espace et dans le temps, des phénomènes :

- d'amplitudes variées ;***
- d'échelles spatiales variées ;***
- d'échelles temporelles variées.***

Géophysique et repère de référence terrestre



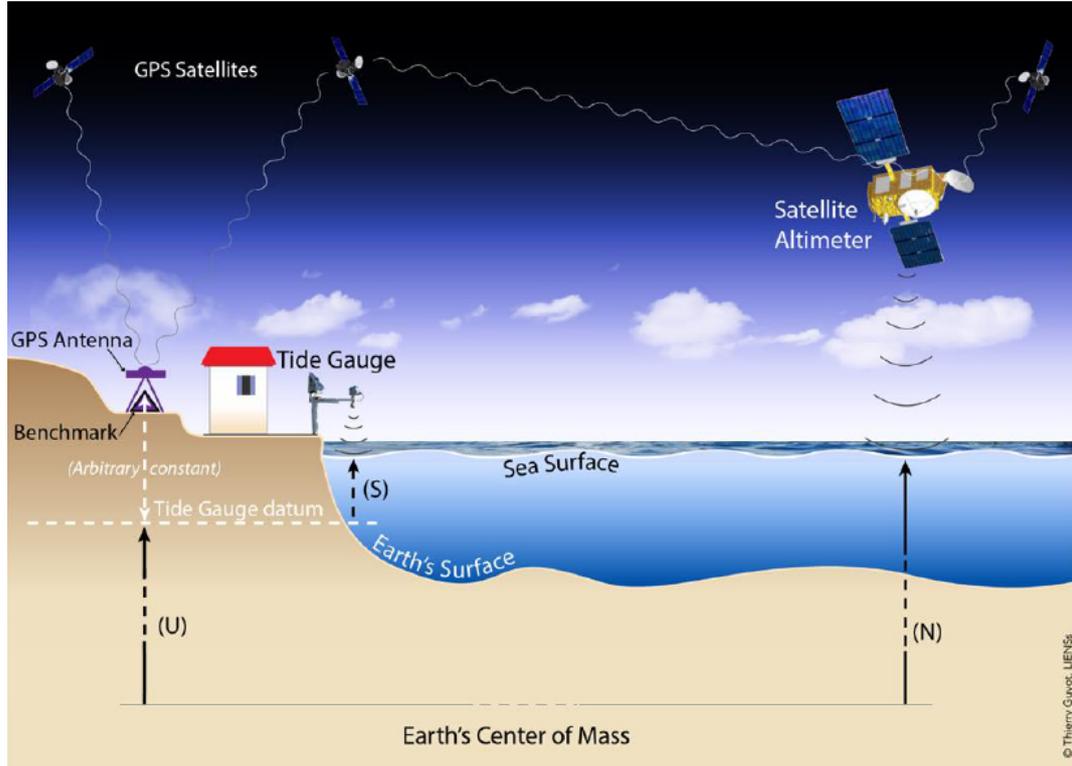
Le système Terre. Source : [Biancale et al., 2017].

*Les vitesses horizontales permettent d'étudier la tectonique des plaques ou des déformations locales.
Les vitesses verticales permettent d'étudier le rebond postglaciaire.
Les positions de stations exprimées dans ce repère permettent d'étudier les séismes, etc.*

Exemple lié au réchauffement climatique

La mesure du niveau des mers

Marégraphes



Crédits : Thierry Guyot, LIENSs.

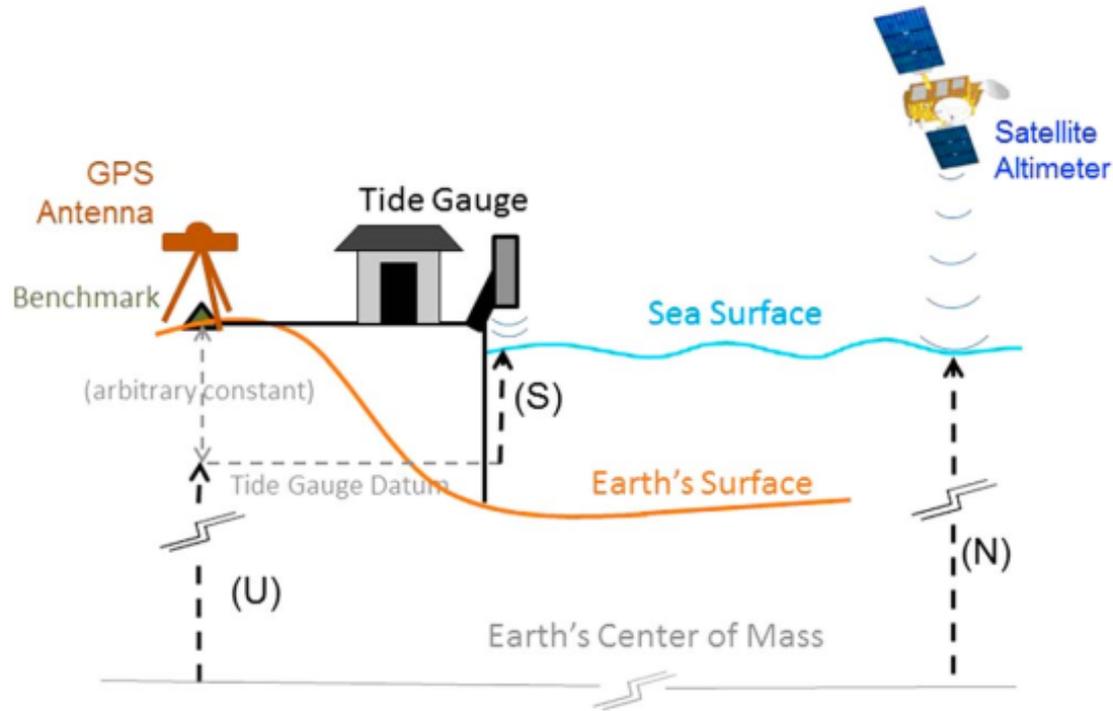
Altimétrie



Crédits : JPL.

Exemple lié au réchauffement climatique

La mesure du niveau des mers



Source : [Wöppelmann & Marcos, 2016]. © AGU.

Marégraphes :

Mesure locale attachée à la croûte terrestre

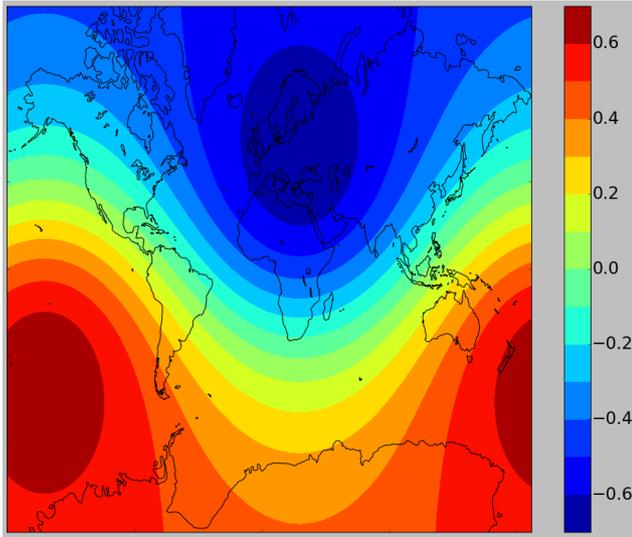
=> Dépendance au TRF

Altimétrie :

Mesure globale, théoriquement absolue (par rapport au centre de gravité de la Terre)

=> Dépendance à l'orbite et donc au TRF

Géophysique et repère de référence terrestre



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].

Crédits : David Coulot, IGN.

Avec les mêmes erreurs dans les dérives de l'origine et une erreur dans la dérive de l'échelle de 0,3 mm/an, [Wöppelmann & Marcos, 2015] évaluent l'erreur possible sur l'élévation moyenne du niveau des mers à 0,5 mm/an.

→ La qualité du repère géodésique global influe sur celle des niveaux des mers déduits des enregistrements des marégraphes.

Géophysique et repère de référence terrestre

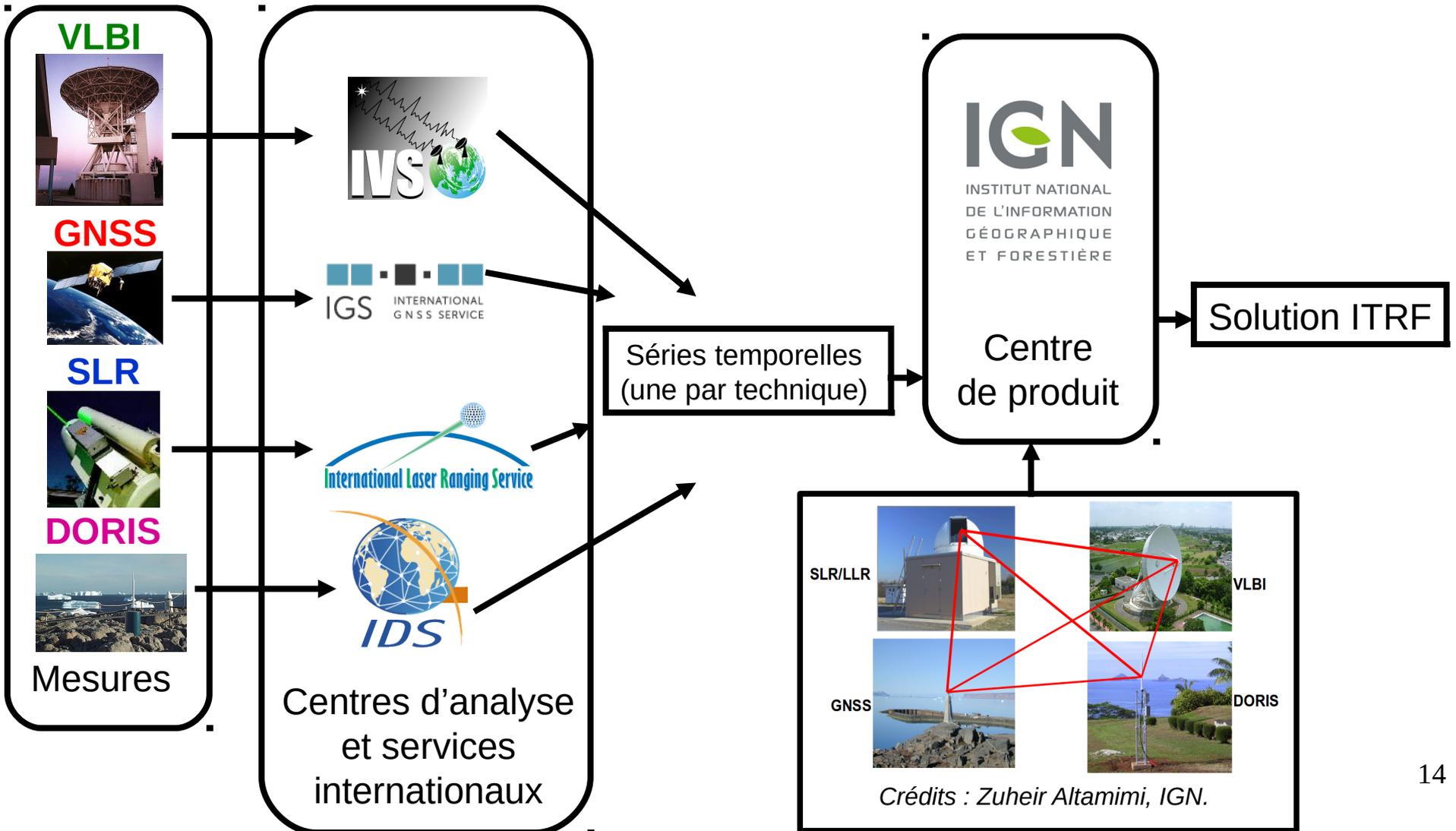
- 
- “The current scientific and societal user requirements are demanding in terms of accuracy, resolution, latency and reliability, and the requirements are expected to increase in the future. The GGOS products must have sufficient accuracy, temporal and spatial resolution, and latency to meet these 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].

- 
- « **GRASP** propose d'embarquer les quatre techniques géodésiques fondamentales (DORIS, GNSS, VLBI, SLR) qui servent à la détermination de l'ITRF. **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].

Calcul d'un repère de référence terrestre

PRINCIPE DU CALCUL :



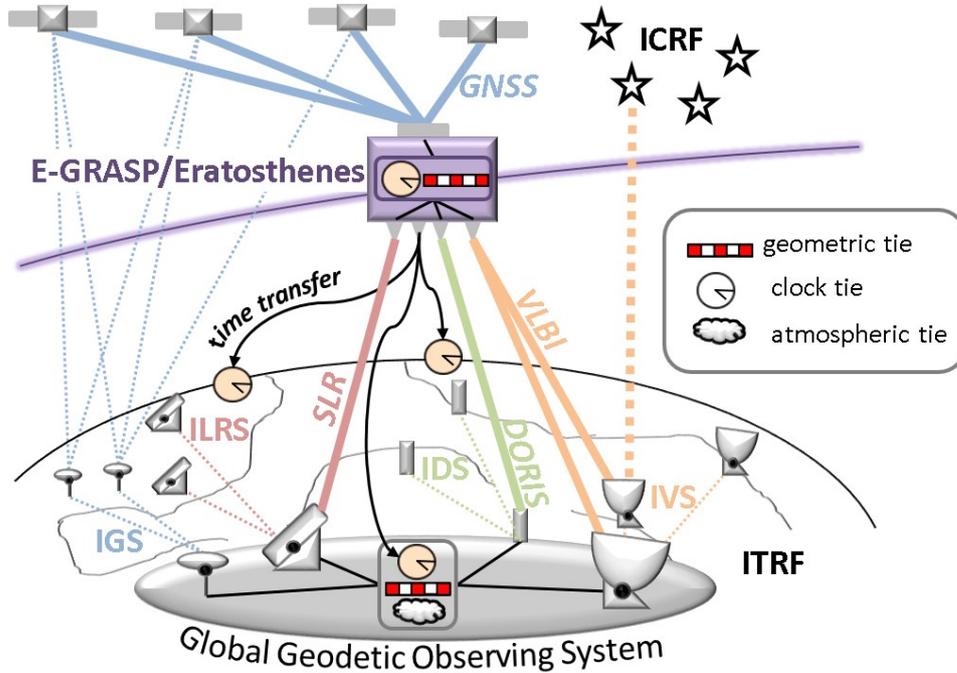
Principales limitations :

- Répartition inhomogène des stations SLR et VLBI
- Modélisation des mouvements non-linéaires des stations
- Précision et exactitude des produits des techniques (orbites, instruments, etc.)
- Nombre et qualité des rattachements au sol

Nouveaux systèmes satellitaires d'observation

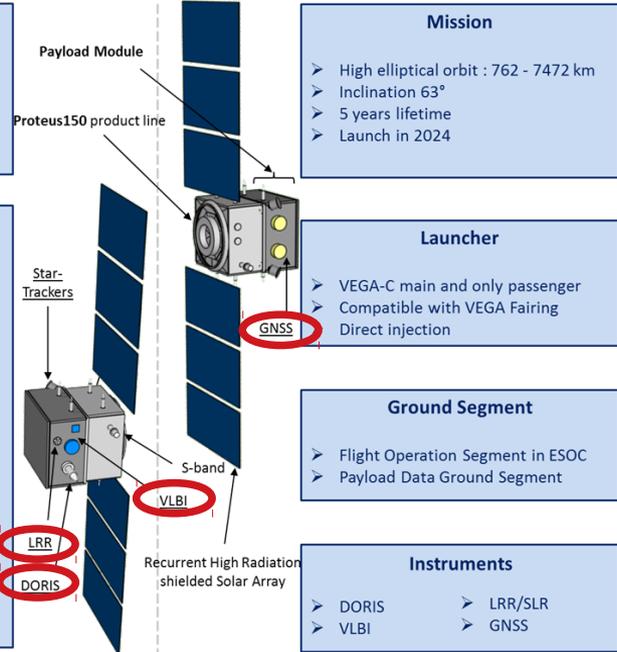
Satellites multi-techniques :

Proposition de mission spatiale faite à l'ESA en juin 2017 (Earth Explorer-9 call).



- Mission requirements**
- High elliptical orbit with enhanced observations opportunities.
 - Multiple payload to drastically improve TRF knowledge with multiple application

- Satellite**
- Instruments & Star-Trackers on a dedicated Payload Module
 - Recurrent radiation-shielded Solar Array (SA)
 - Platform Proteus150 with structure adaptation to support the Solar Array
 - Satellite dry mass < 500 kg
 - Attitude Control : reaction wheels
 - Uncontrolled reentry : lowering perigee with chemical propulsion
 - TMI & TTC : S-band
 - Scientific data 220 Mbit/day
 - Yaw Steering to optimize power along the orbit

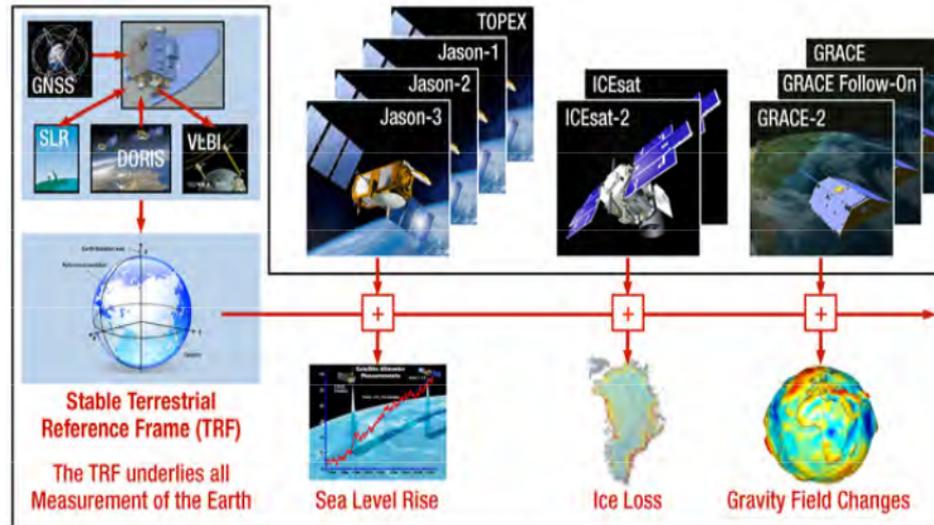


Source des images : [Biancale et al., 2017].



Objectifs scientifiques :

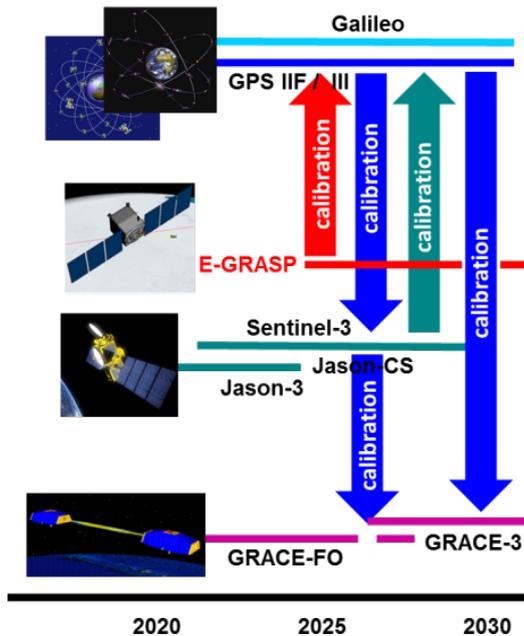
- **Objectif principal.** Atteindre les objectifs de qualité fixés pour le repère géodésique global (1 mm d'exactitude et 0.1 mm/an de stabilité) en déterminant un tel repère avec les données de ce satellite.
- Ce repère permettra, p. ex., de (i) réinterpréter les données d'altimétrie satellitaire et les enregistrements des marégraphes et (ii) de réinterpréter les données de certains satellites d'observation de la Terre.



Source : [Bar-Sever et al., 2014]. Crédits : JPL.

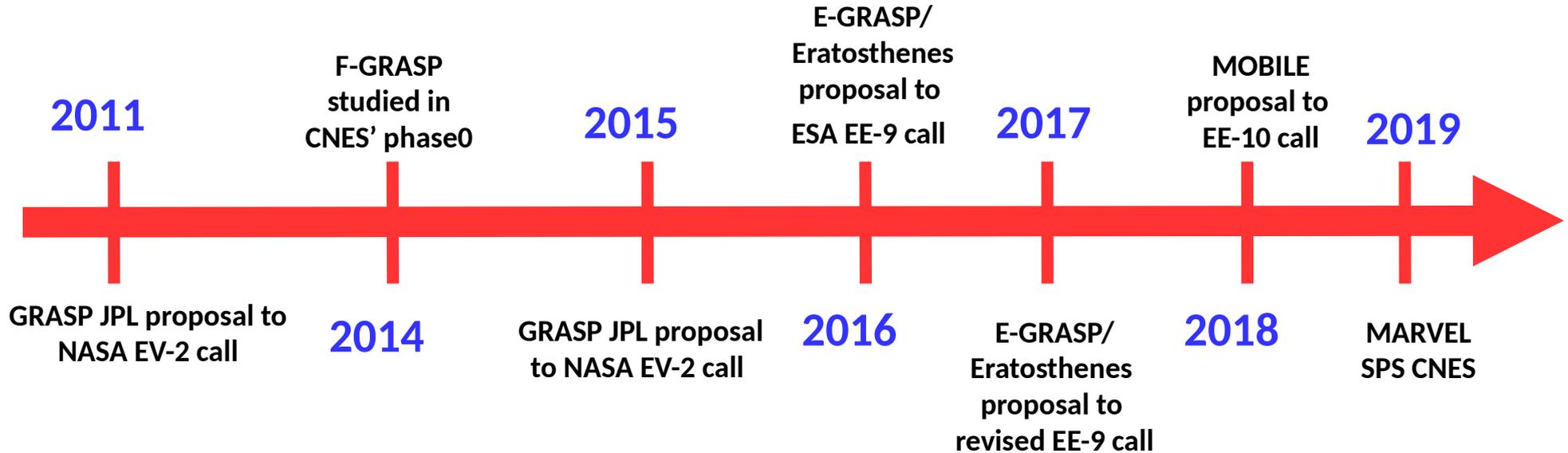
Objectifs scientifiques :

- **Objectif secondaire.** Ce repère sera propagé dans le passé et dans le futur avec le champ de vitesses et permettra une meilleure contribution des GNSS pour des applications nécessitant une grande qualité de positionnement (étalonnage très précis des antennes).



Source : [Biancale et al., 2017].

Historique :



Mission MARVEL :

1) Une constellation haute au-dessus de 7000 km :

La constellation haute (**minimum 2 satellites, pour une continuité de la mesure**) composée de plateformes équipées de l'ensemble des instruments précis de suivi tels qu'identifiés dans le concept E-GRASP (réflecteur ou transpondeur SLR, récepteurs GNSS et DORIS, émetteur VLBI et micro-accéléromètre), répond aux exigences du positionnement millimétrique.

2) Une constellation basse en-dessous de 450 km :

La constellation basse (**minimum 1 satellite**) équipée d'une source laser, d'un micro-accéléromètre et d'un récepteur GNSS est considérée comme micro-senseur du champ de gravité par le biais de la mesure laser micrométrique réfléchie ou transpondée par les satellites de la constellation haute.

Mission MARVEL :

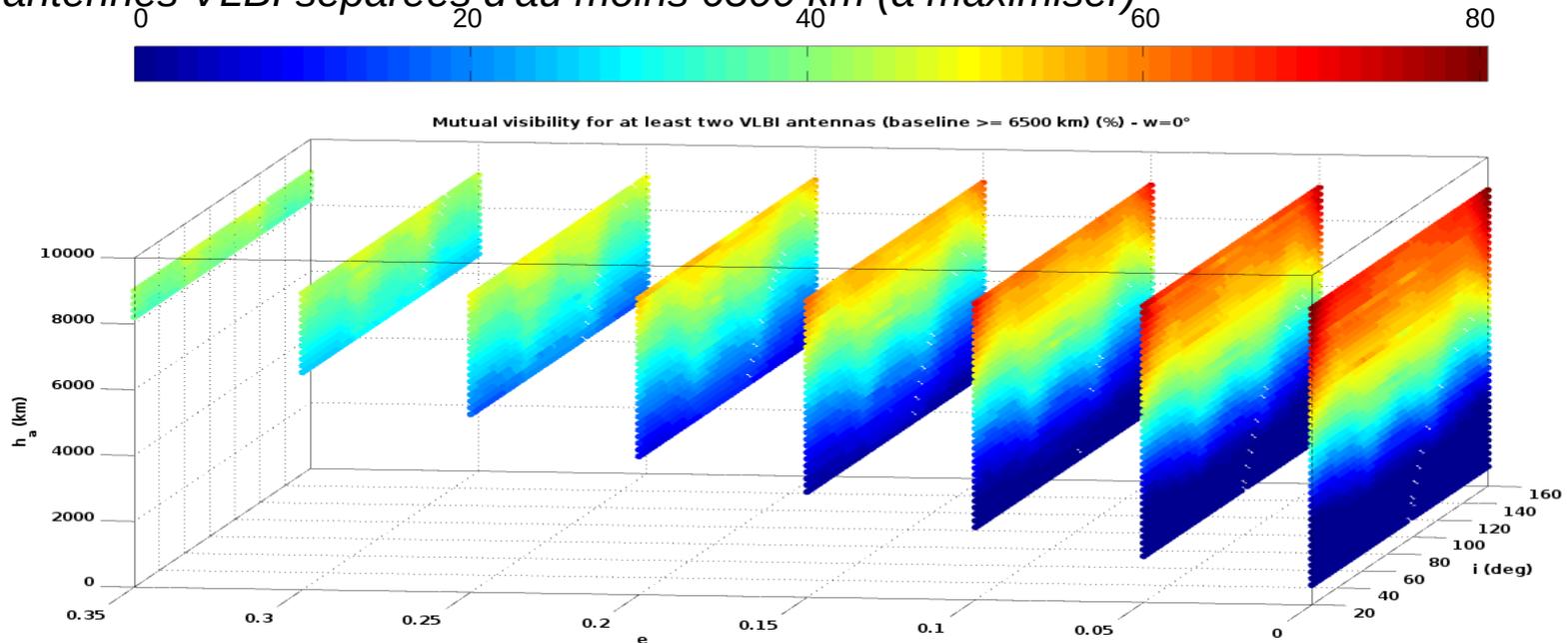
- 1) Détermination du système de référence terrestre **avec une exactitude millimétrique**, exigée par les applications en sciences de la Terre
- 2) Suivi de la **redistribution des masses à l'échelle de 200 km avec une précision de 1cm/mensuel 0.1mm/10yr EWH** qui donne notamment accès aux variations du déséquilibre énergétique de la Terre avec une précision de $\sim 0.2 \text{ W/m}^2$, aux variations hydrologiques de plus de 80% de la surface des bassins hydrologiques, aux variations de masse de l'océan à la précision de $\sim \pm 0.05 \text{ mm/yr}$, et aux estimations de fonte des glaces continentales à une précision de $\sim \pm 0.1 \text{ mm/yr}$
- 3) **Continuité temporelle** et possibilité de complétion spatiale.

Quelques résultats de simulations sur E-GRASP

1- Obtention d'une orbite optimale :

Exemple de critères : Visibilité simultanée de GRASP par deux antennes VLBI distantes.

Critère = pourcentage de la semaine durant lequel GRASP est visible par au moins deux antennes VLBI séparées d'au moins 6500 km (à maximiser)

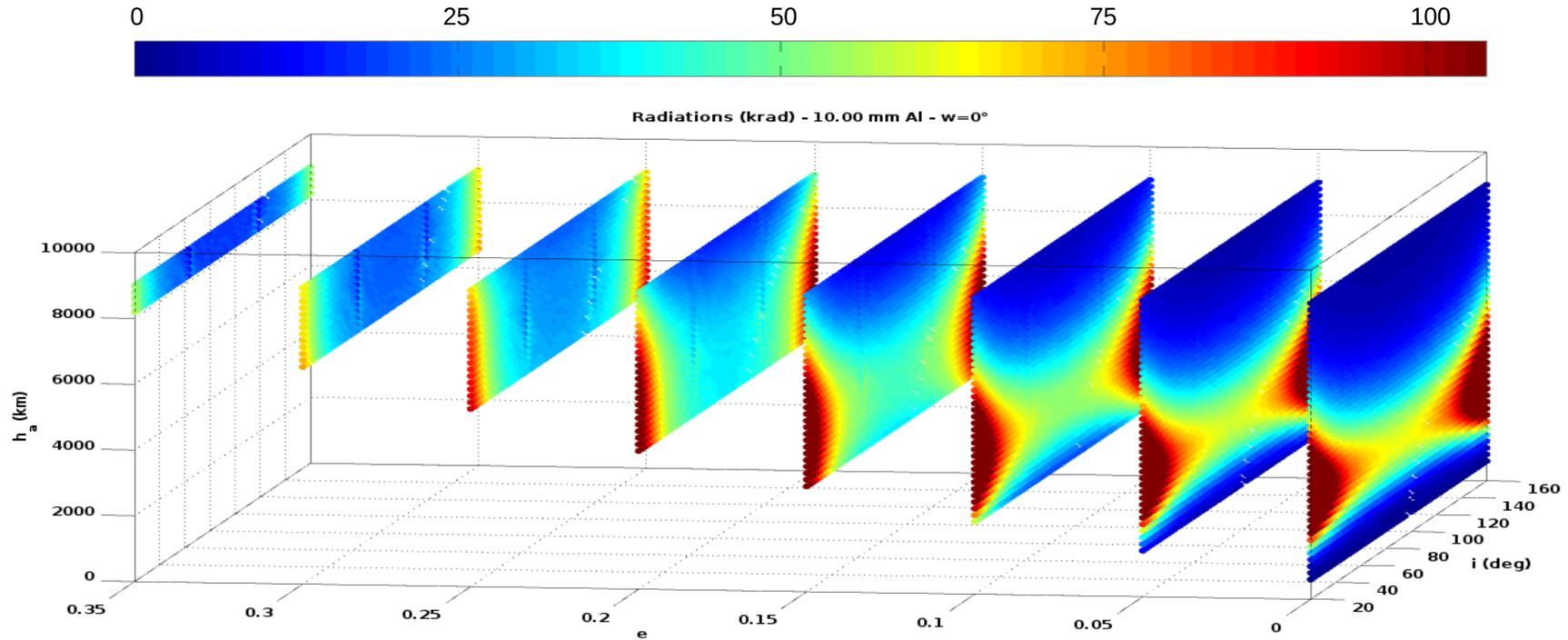


Crédits : David Coulot, IGN.

Quelques résultats de simulations sur E-GRASP

1- Obtention d'une orbite optimale :

Exemple de contraintes : *dose totale de radiations sur 3 ans (à minimiser)*



Crédits : David Coulot, IGN.

Quelques résultats de simulations sur E-GRASP

1- Obtention d'une orbite optimale :

- Tirage de différentes orbites (~52 000).
- Relation de Pareto (algorithmes génétiques) utilisée avec différents critères incompatibles
→ ~ 2000 scénarios orbitaux retenus.
- Recherche de scénarios « moyens » sur la base de différents critères
→ 12 scénarios orbitaux.
- Orbite finalement retenue : 762 x 7 472 km ; 63.42° d'inclinaison.

Orbite d'E-GRASP/Erathosthenes sur 15 jours, dans le repère terrestre.

L'échelle de couleurs donne l'heure locale de passage.

Logiciel Ixion

<http://climserv.ipsl.polytechnique.fr/ixion/> .

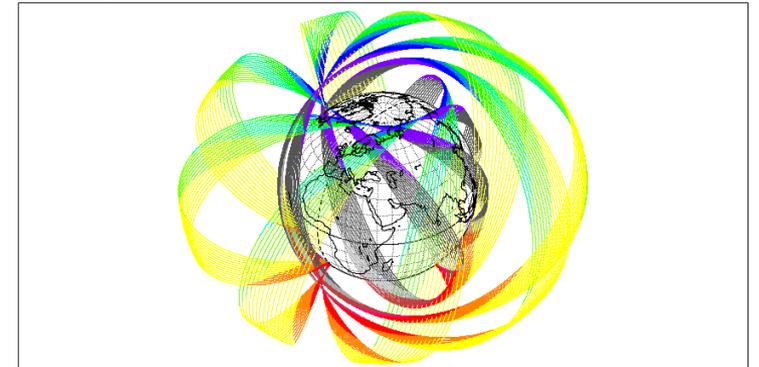
Crédits : Michel Capderou, LMD.

Erathosthenes
Orbit - ref.: Earth

>>> Time span shown: 15.00 days

Equiv. altit. = 4117.0 km a = 10495.137 km
CRITICAL Incl. = 63.42 ° e = 0.319672
Period = 178.36 min * Rev/sid.d = 8.05
h_a = 7472 km; h_p = 762 km; arg. perigee: +180.00 °.

LMT (local) 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 hours



Projection: Orthographic
Property: none
⊕ T.:Azimuthal - Graticule: 10°

Project. center: 38.0 ° N; 44.0 ° E
Aspect: Oblique
[+2] [-90.0/ +52.0/ +46.0] [] EGM2008

Longitude / Initialisation:
Asc. Node: 90.00 ° [12:00 LMT]

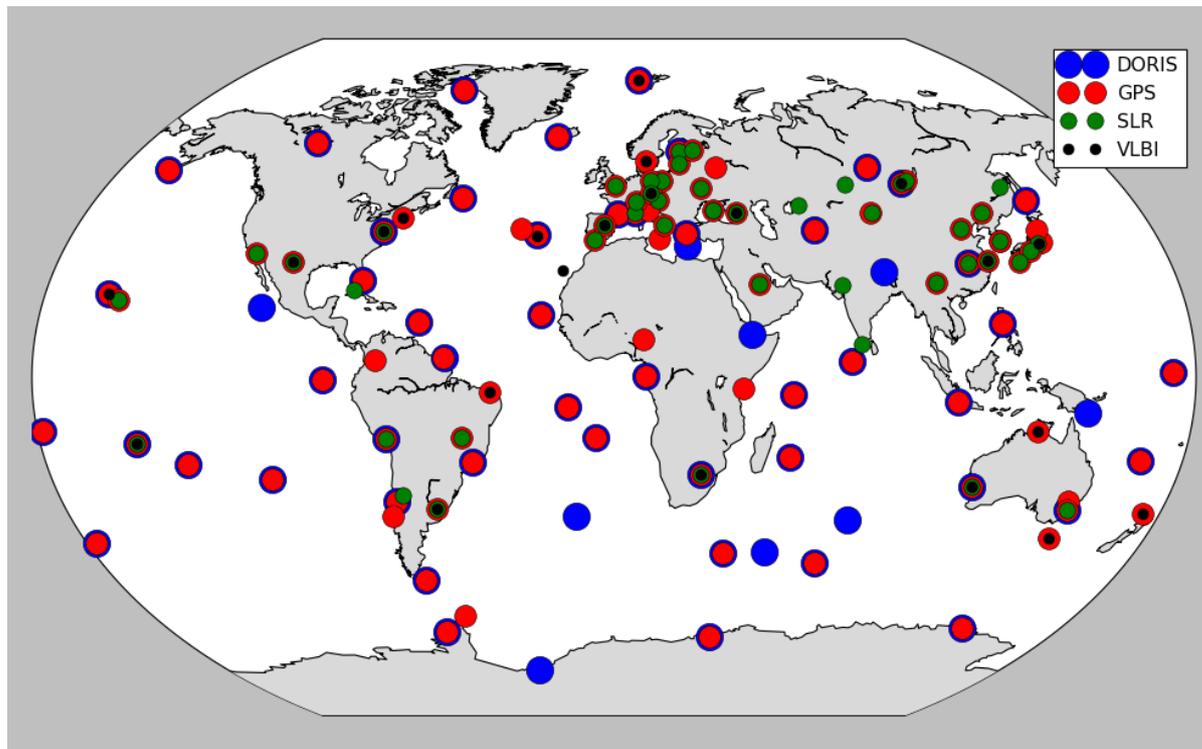
Ιξίων
MC ★ LMD
Ατλας

Quelques résultats de simulations sur E-GRASP

2- Simulations numériques :

Réseau sol tel que probable à l'horizon 2025.

Mesures simulées, sur cinq ans, avec bruits et erreurs réalistes pour les quatre techniques.



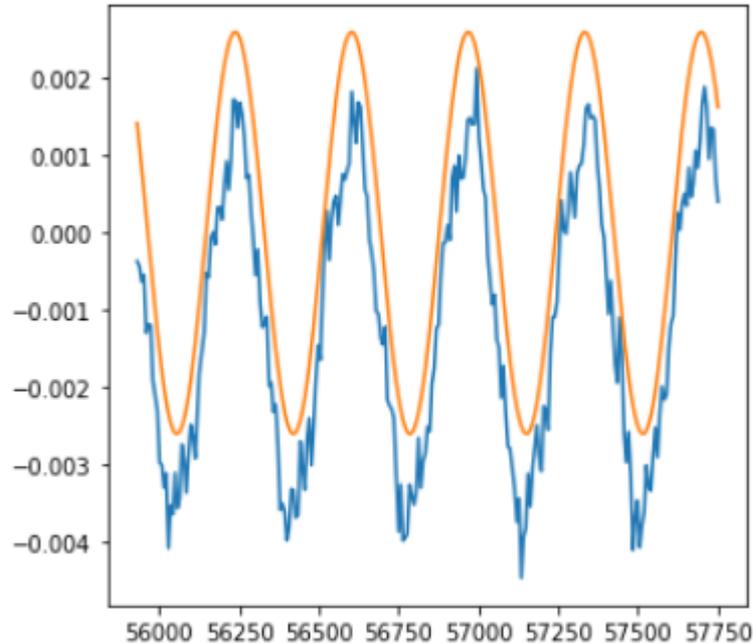
*Carte du réseau sol utilisé pour les simulations numériques pour E-GRASP.
Crédits : Arnaud Pollet, IGN.*

Quelques résultats de simulations sur E-GRASP

2- Simulations numériques :

Exactitude du repère obtenu avec des mesures sur un satellite E-GRASP uniquement, après 5 ans : ~ 1.5 mm

Stabilité du repère obtenue : < 0.1 mm/an



Translations hebdomadaires en Y (courbe bleue) entre le repère de référence terrestre obtenu par traitement des mesures simulées sur le satellite E-GRASP et le repère de référence terrestre original (en m), calculées sur une période de 5 ans (abscisses : MJD). La courbe orange correspond au mouvement du géocentre simulé sur cette même composante Y.

Nouvelle stratégie d'analyse des données (Projet ANR GEODESIE)

Projet ANR GEODESIE

- **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 JCJC. Construit comme le premier d'une série.**
- **Aide de l'ANR sur quatre ans (2017-2020) avec un établissement partenaire unique, l'IGN.**



- **Site Internet : <https://geodesie-anr.ign.fr> .**

- **Pour nous suivre sur Twitter : @GEODESIE_ANR .** 

Équipe du projet



B. Garayt



L. Métivier, S. Nahmani,
A. Pollet, P. Reischung,
V. Schott-Guilmault*



ÉCOLE NATIONALE
DES SCIENCES
GÉOGRAPHIQUES

X. Collilieux, D. Coulot,
F. Tertre

* Double affiliation CNES/IGN



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

* Maintenant au GFZ



Systèmes de Référence Temps-Espace

SYRTE



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

24 personnes – six établissements/laboratoires

Objectifs du projet

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**.

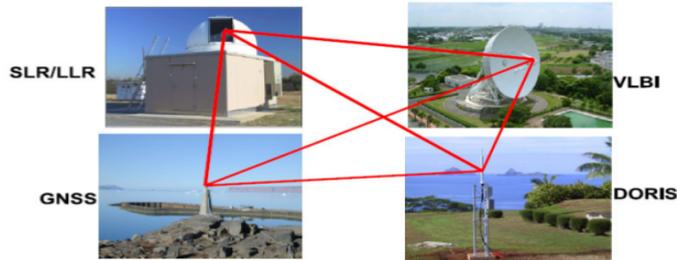
Fournir de même des séries temporelles de niveaux des mers calculées, à partir des mesures d'**altimétrie satellitaire** et des enregistrements des **marégraphes**, avec ces références.

Préparer la possible arrivée dans un futur proche de **satellites de type GRASP**.

Poser les jalons pour la **géodésie de la prochaine décennie**.

Verrous du projet (tels que présentés dans la proposition de 2016)

- **Données spatiales.** Toutes les données spatiales depuis le lancement de Beacon Explorer-B (1964) jusqu'à fin 2016. Modèles et standards nécessaires sur toute la période.
- **Liens entre les techniques.** 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.
- **Combinaison des données spatiales.** Quelle méthode d'assimilation de données ? Quels modèles physiques/statistiques ? Quelle pondération des données ?
- **Évaluation des références géodésiques.** Validation des choix techniques et scientifiques par simulations. Évaluation des références avec des données et modèles exogènes.

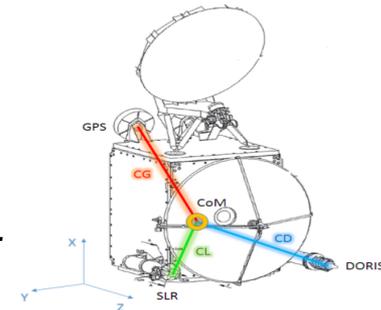


Gauche : rattachement local au sol.

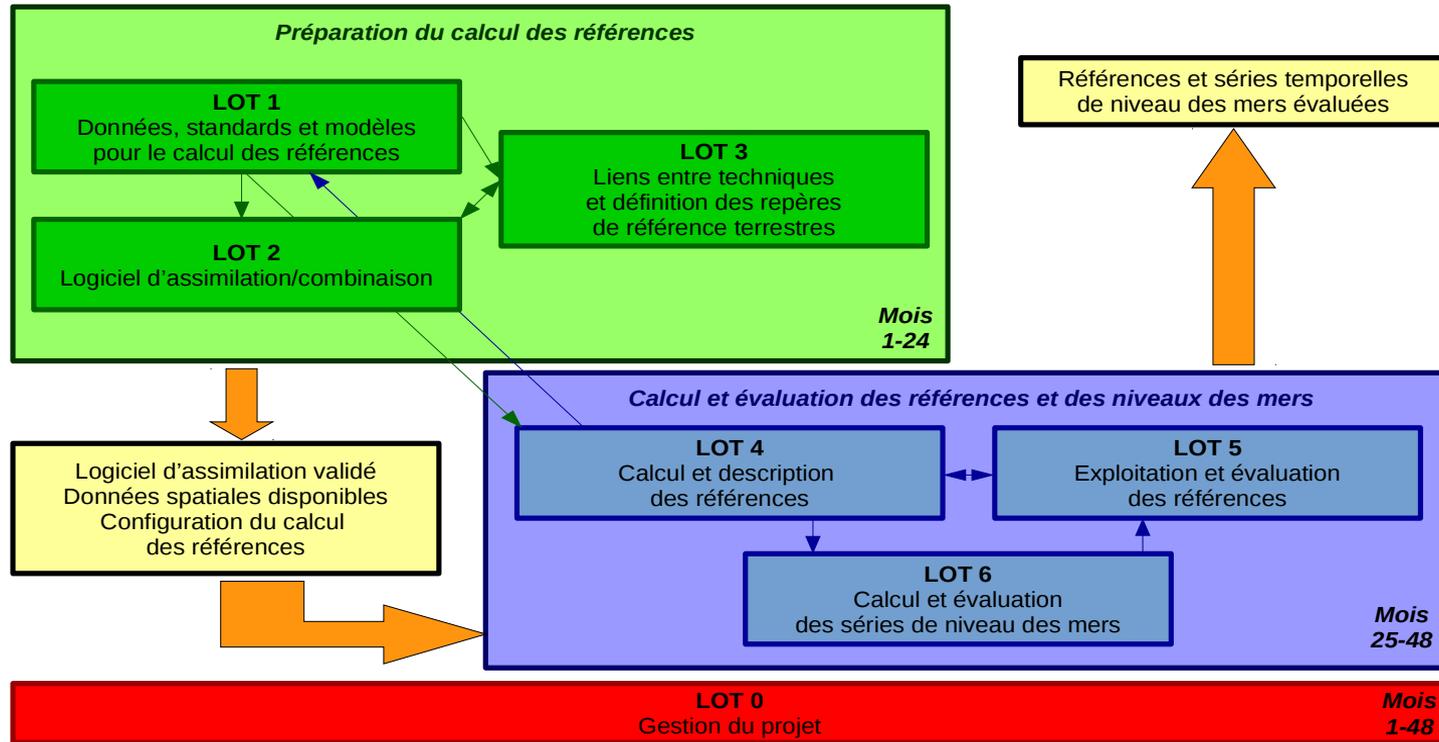
Crédits : Zuheir Altamimi, IGN.

Droite : rattachement spatial sur Jason-2.

Source : [Zoulida et al., 2016].

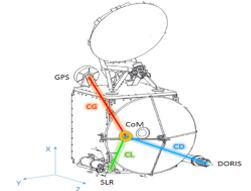
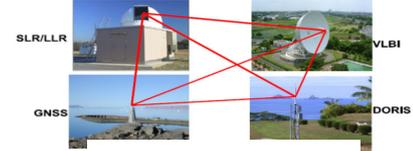


Phases du projet

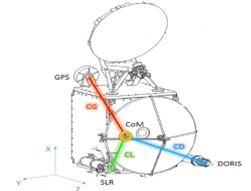
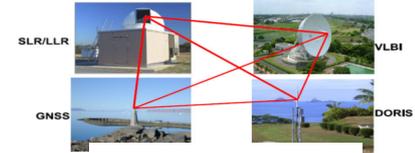


Crédits : David Coulot, IGN.

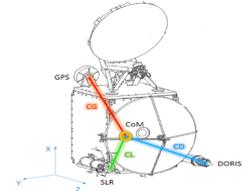
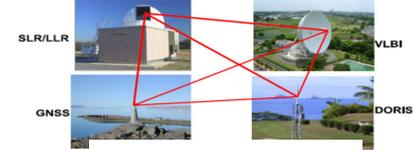
Etape 1 – Assimilation des données et calcul des références géodésiques



Etape 2 – Calcul du niveau des mers

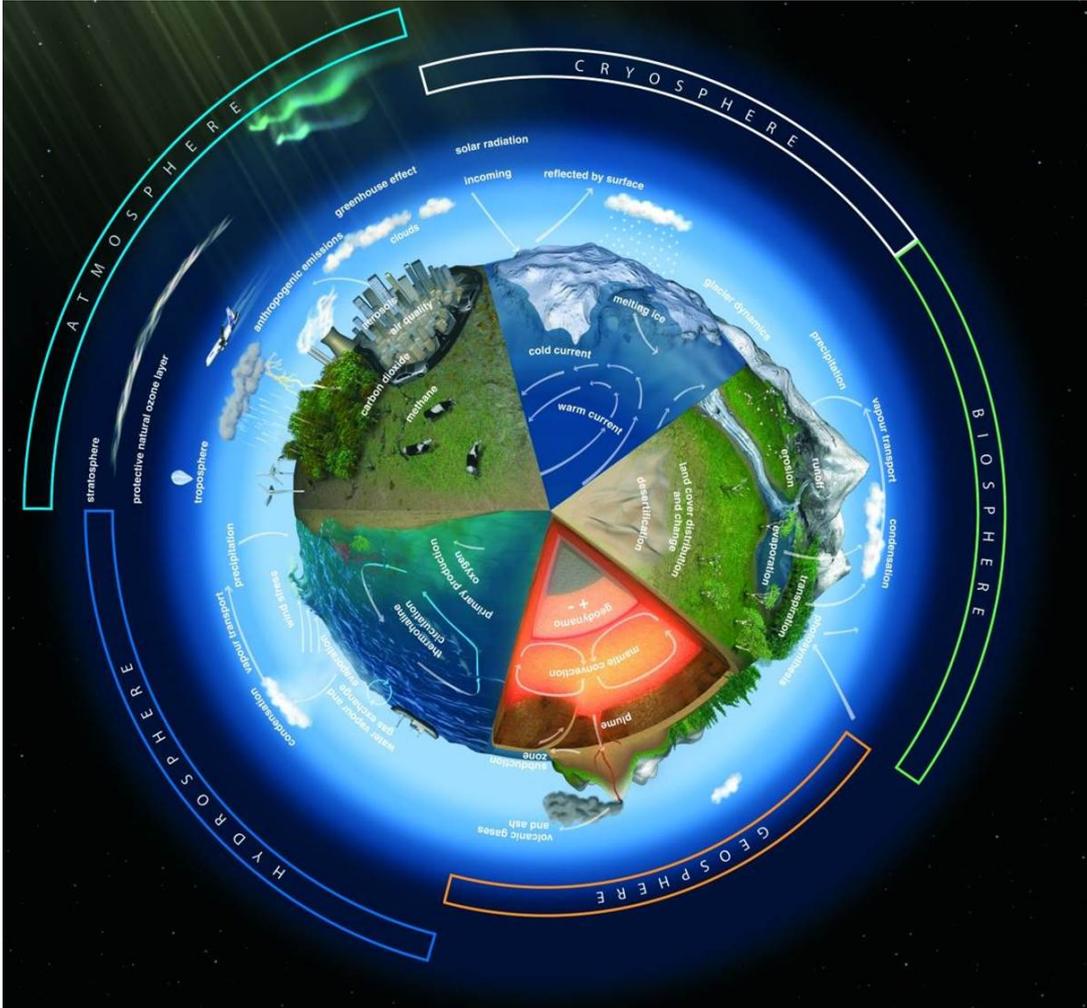


Etape 3 – Préparation à assimiler de nouvelles données



Crédits : David Coulot, IGN.

Pour appréhender la Terre dans son ensemble



→ Vers une assimilation de plus en plus de données diverses et complémentaires dans un modèle de Terre de plus en complet.

→ Vers une appréhension de la Planète comme un système de sous-systèmes en totale interaction.

?