

Les projets spatiaux à intérêt géodésique (GNSS, MARVEL...)

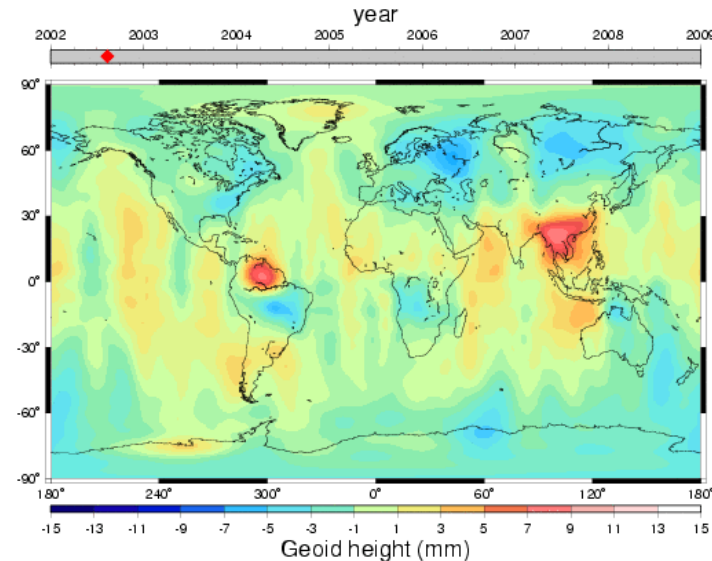
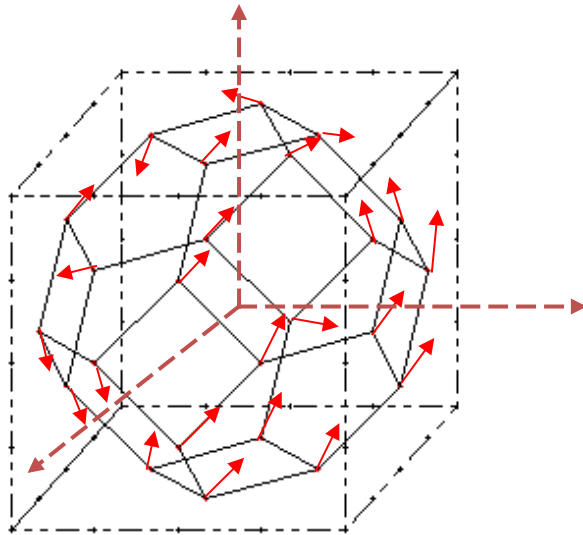


Les infrastructures géodésiques – 7juin 2019 – Bureau des longitudes

Les missions spatiales...

... jouent un rôle essentiel face aux objectifs fondamentaux de la géodésie :

- Réalisation d'un repère de référence Terrestre international (ITRF)
- Mesure du champ de gravité global et de ses variations
- Mesure des déformations de la Terre, du mouvement du pôle,...



Les missions spatiales...

La géodésie *spatiale* représente aussi un enjeu sociétal important en:

- Contribuant aux observations du changement global du système terre (Cf. GGOS)

Exemple :

Hausse de la mer au 20^{ème} siècle

1900-1990 (reconstructions basées sur les mesures marégraphiques)

Church et al. (2013) : 1.7 ± 0.3 mm/an

Jevrejeva et al. (2014) : 1.9 ± 0.3 mm/an

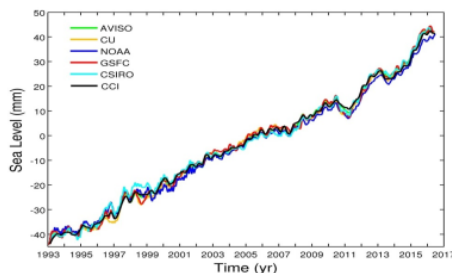
Hay et al. (2015) : 1.2 ± 0.2 mm/an

Dangendorf et al. (2017) : 1.1 ± 0.3 mm/an

1.1 – 1.9 mm/an

10 – 17 cm

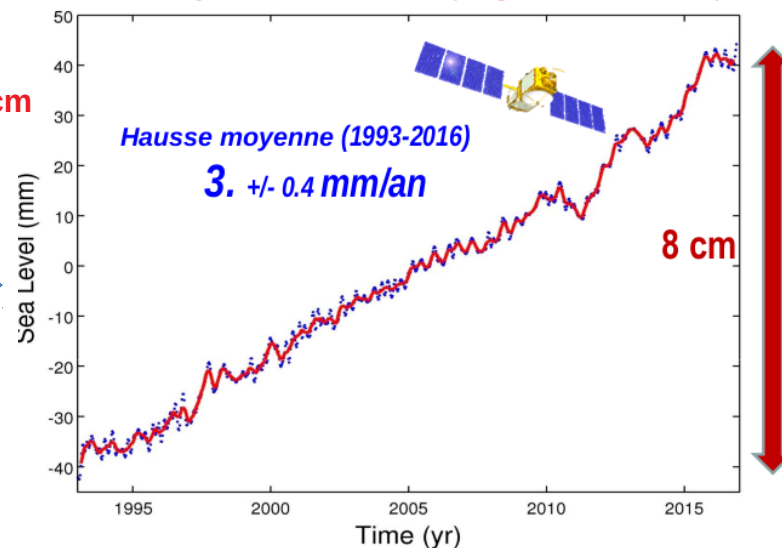
La sélection des marégraphes a un impact important sur l'estimation de la hausse de la mer



**1993-2016
(altimétrie spatiale)**

$3. \pm 0.4$ mm/an

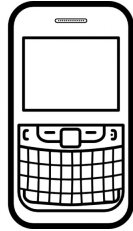
Niveau moyen de la mer altimétrique (janv.1993-dec.2016)



Les missions spatiales...

La géodésie *spatiale* représente aussi un enjeu sociétal important en:

- Contribuant aux observations du changement global du système terre (Cf. GGOS)
- Facilitant l'accès à l'ITRF via les GNSS (Cf. UN-GGIM)



Les perspectives...

- Une amélioration des techniques de géodésie spatiale: Galileo et multi-GNSS, hybridation DORIS-GNSS, SLR
- Rattachement de ces techniques géodésiques via les « liens-spatiaux » (missions type GRASP)
- De nouveaux concepts de missions (atomes froids – séminaire IFRAF de 2016 au CNES, vol en formation type GRICE,...)
- Utilisation de cubsat (mission type GEOCON)



GNSS

Le système Galileo

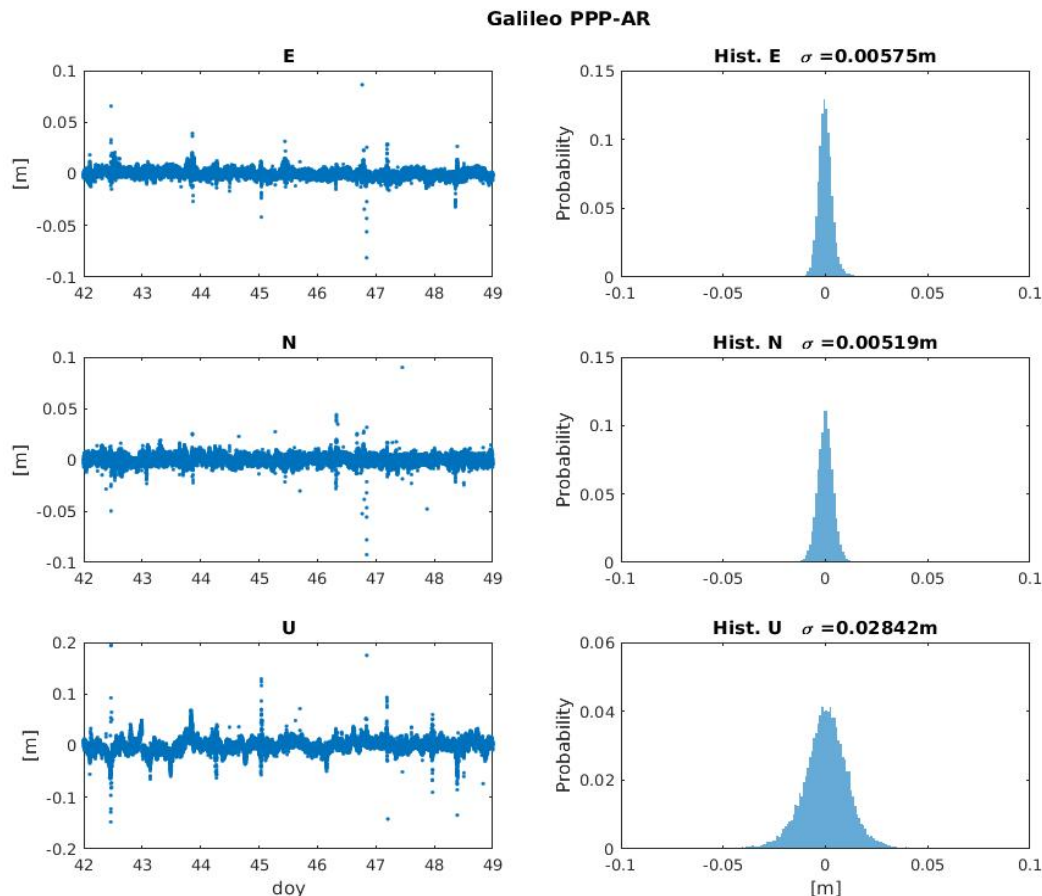
- Performance confirmée : Elle sera au moins aussi bonne que GPS lorsque la constellation sera complète
- Les PCO Galileo sont disponibles. L'IGS teste la possibilité de déterminer l'échelle du repère terrestre et les PCO des satellites GPS actuels et passés (en propageant l'information)
- L'interopérabilité avec GPS est confirmée et l'hybridation des deux systèmes permettra d'améliorer encore la précision
- Galileo et GPS resteront des sources essentielles de données géodésiques
 - Il doivent être maintenus a minima à ce niveau de performance
- L'inversion des paramètres géodésiques est sensible aux caractéristiques orbitales de la constellation. Pour pouvoir encore améliorer les résultats, il faudra donc :
 - Prendre en considération cet aspect dans le choix des évolutions de la constellation
 - Inclure des satellites sur des orbites IGSO (GEO inclinée type Beidou)

Exemple d'un traitement cinématique Galileo seul avec fixation des ambiguïtés

- Station (fixe) BRUX
- toutes les 30s pendant 1 semaine
- Mode PPP-AR (Ambig. Resol.)
- produits GRM / logiciel GINS

Katsigianni et al. 2019

Résultats très encourageants



Évolutions du système/données Galileo

➤ Lien inter-satellite

MESURER LE CHAMP AVEC DES HORLOGES (CHRONO-GÉODÉSIE)

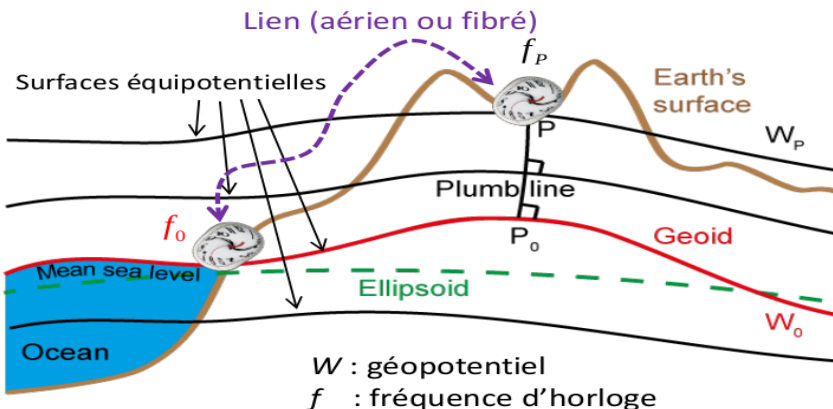
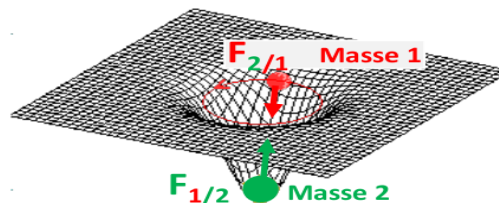
Géodésie chronométrique

Principe

- **Gravitation**

- Mécanique newtonienne : force gravitationnelle F
- Relativité Générale (RG) : courbure de l'espace-temps

- En RG, le temps s'écoule différemment pour 2 horloges soumises à un potentiel gravitationnel différent (dilatation du temps gravitationnel)
- Une comparaison d'horloges permet de **déterminer des différences de géopotential ΔW** à la surface de la Terre



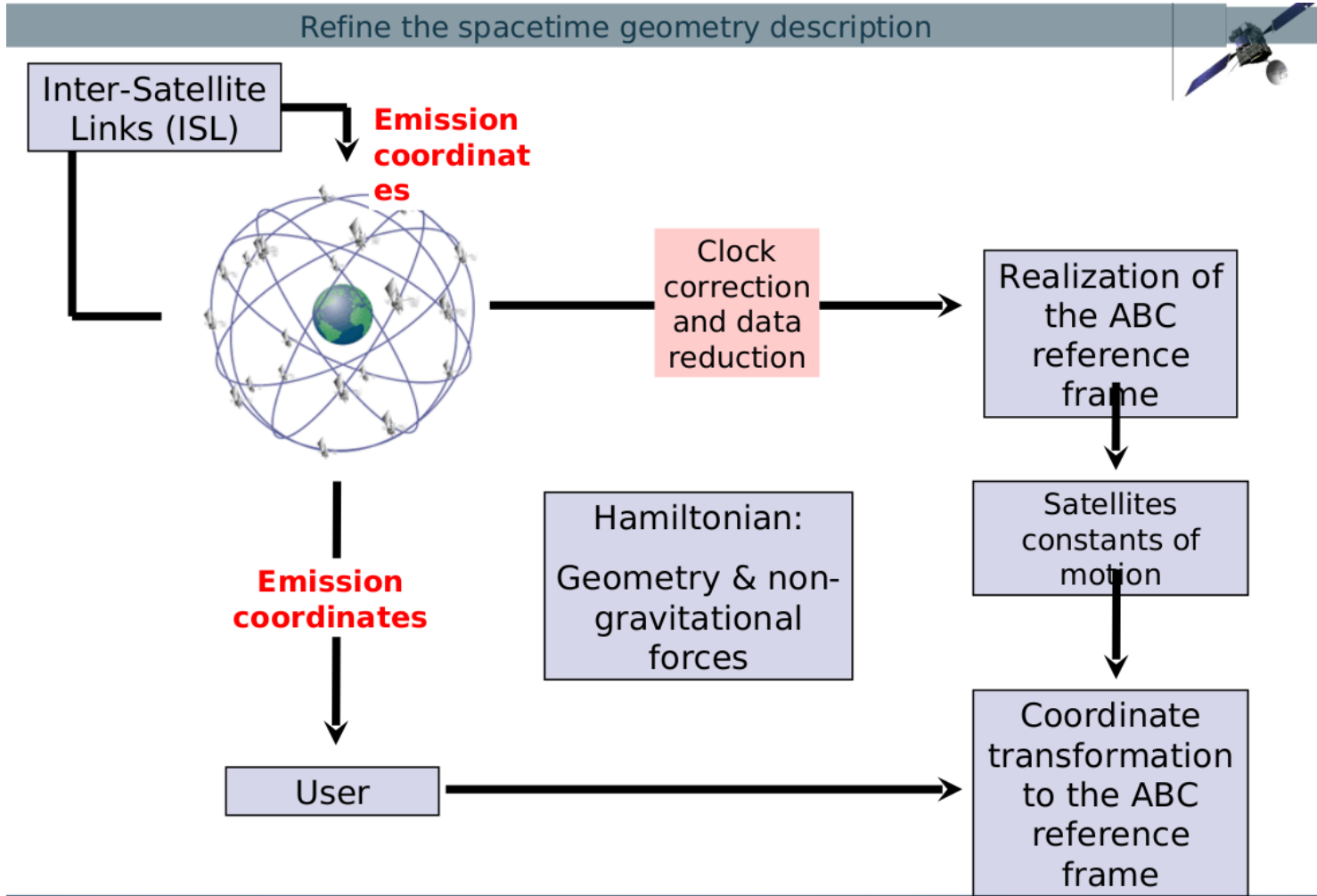
- Exactitude sur la comparaison :

$$\frac{\Delta W}{c^2} \approx \frac{\Delta f}{f_0} \approx 10^{-18}$$

- Correspond à commettre une erreur :

→ $\Delta h \approx 1 \text{ cm}$
 $\Delta W \approx 0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$

RÉALISER UN REPÈRE DANS L'ESPACE AVEC DES HORLOGES

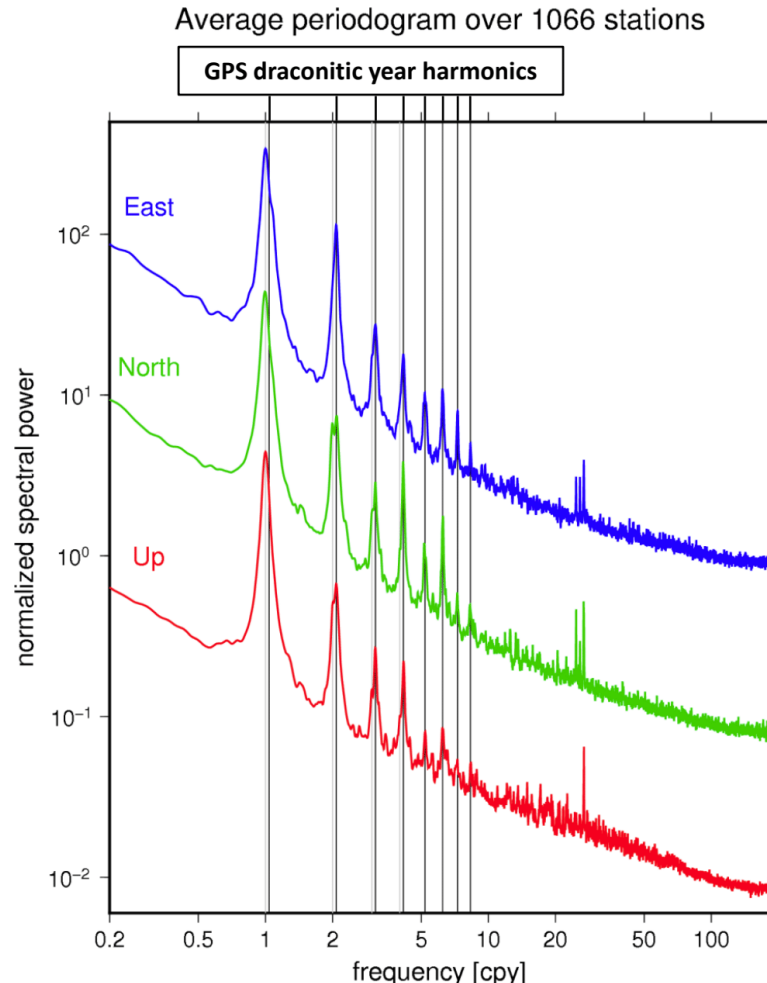


Évolutions du système/données Galileo

- Lien inter-satellite
- Fourniture des informations d'attitude, de température, de puissance d'émission,... pour mieux modéliser les satellites

Anatomy of GNSS station position time series

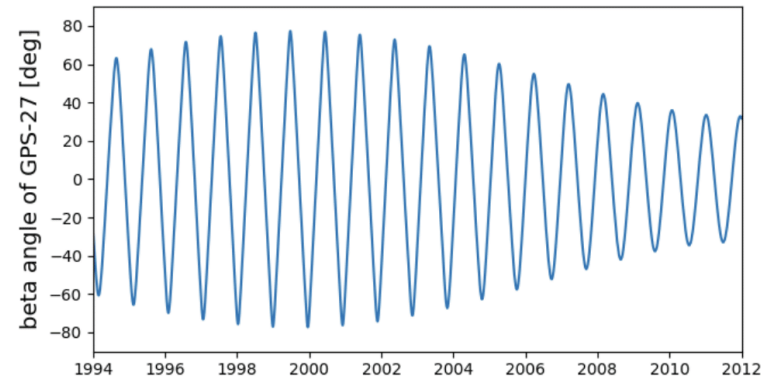
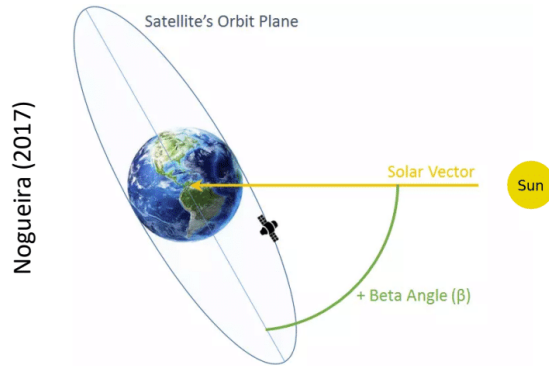
- Draconitic signals:



Draconitic signals (351.6 days and harmonics)

- First identified by Ray et al. (2008), who suggested two possible causes:

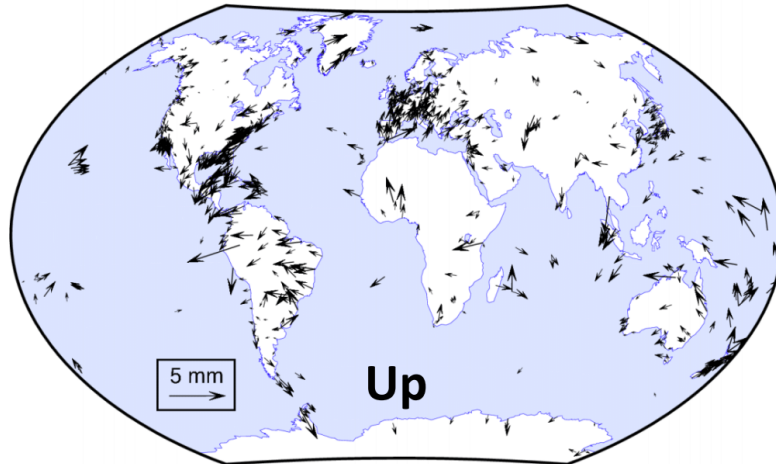
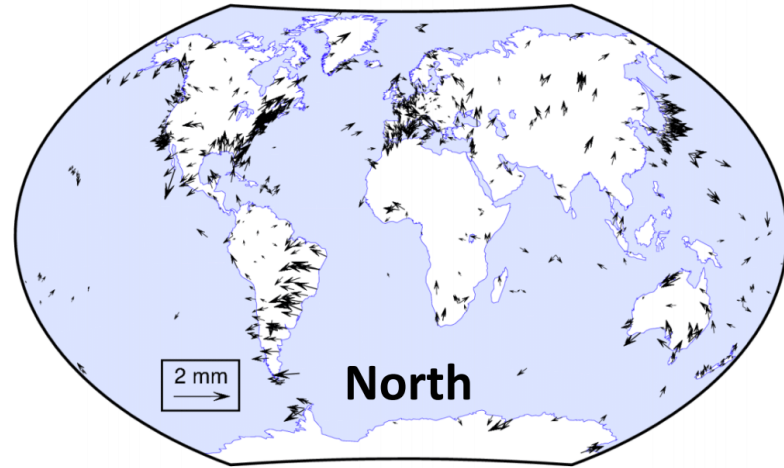
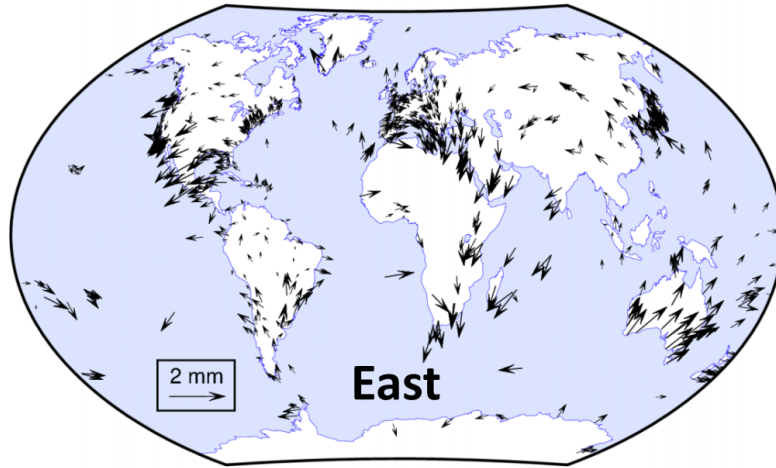
- Orbit modeling errors (esp. solar radiation pressure)



- Aliasing of local direction-dependent errors (e.g., multipath) repeating with station-satellite geometry through daily sampling



Draconitic signals (351.6 days and harmonics)



→ 175.8-day signals in IGS repro2 station position time series

- Strong, large-scale spatial coherence suggests main orbit-related source
- Multipath shown to additionally contribute at some stations by Santamaria-Gomez et al. (2016)

Évolutions du système/données Galileo

- Lien inter-satellite
- Fourniture des informations d'attitude, de température, de puissance d'émission,... pour mieux modeliser les satellites
- Mesurer/fournir les cartes de PCV des antennes des satellites

Embarquer des récepteurs Galileo sur des LEO

- L'intérêt de récepteurs GNSS en orbite sur des LEO est confirmé :
 - Space-tie
 - Calibration d'antenne GNSS
- Dans le futur le nombre de LEO va exploser (nano sat)
- Baisser le coût / encourager le déploiement de récepteurs géodésiques GNSS embarqués pour plus d'opportunités d'équiper des LEO

Segment sol Galileo

- Calibration in-situ des antennes GNSS recommandée
- La perenité des infrastructures au sol est essentielle
- **Le réseau REGINA (CNES-IGN) doit être maintenu dans la durée**



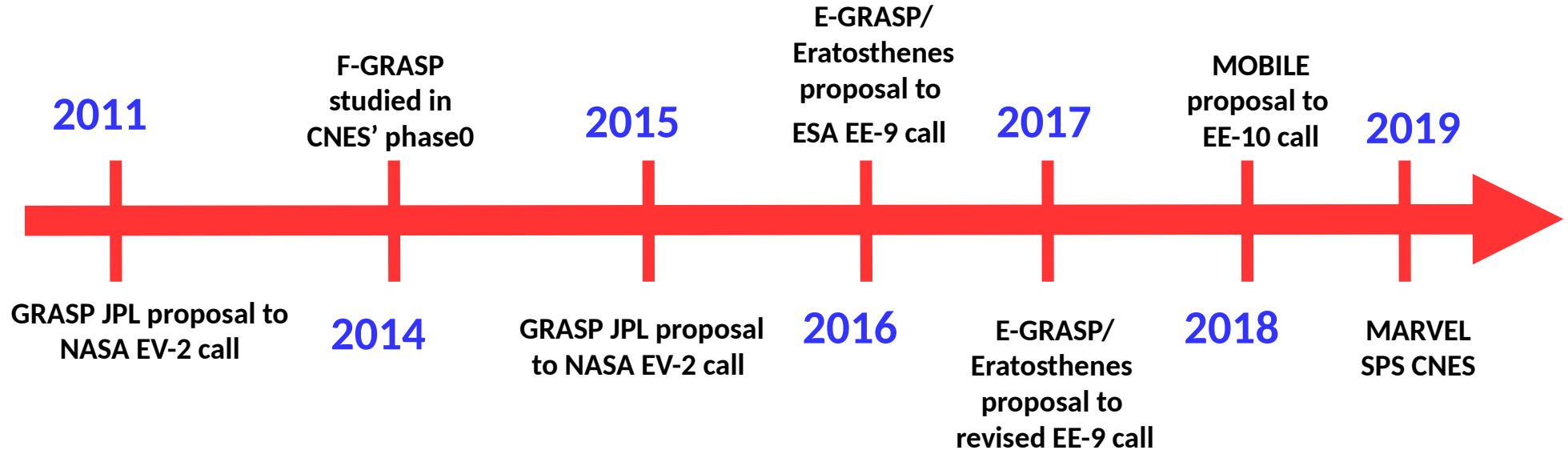
Participation à l'IGS

- Elle est essentielle pour :
 - Contribuer aux objectifs de ces services (fournir des données/produits)
 - Participer à l'amélioration de ces produits via les groupes de travail
 - Le maintien et la reconnaissance des compétences
 - Représenter la France et prendre part aux décisions concernant le service
- La présence de représentants d'organismes nationaux à l'IGS doit être maintenu/densifié (vs le nombre d'Allemands !). Encourager les candidats potentiels lors d'élections
- Le CA Toulousain a fait ses preuves mais est fragile
- Consolider cette activité via une meilleure visibilité (labellisation SNO)
- En faire un CA « national » par l'implication de personnels d'autres organismes

A composite image showing a satellite in orbit above Earth. The satellite has a gold-colored body and large blue solar panel arrays. The Earth's blue and white surface is visible in the background, with a black space filled with stars. The text 'MISSION SATELLITAIRE MARVEL' is overlaid in the center in a bold, red, sans-serif font with a black outline.

MISSION SATELLITAIRE MARVEL

Historique



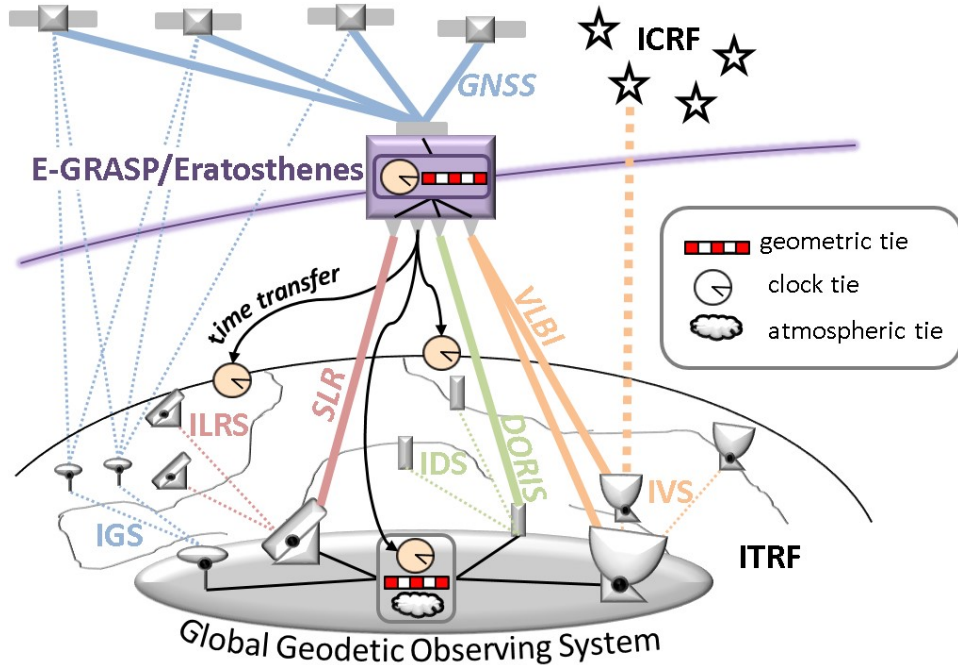
Géophysique et repère de référence terrestre

- 
- “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].

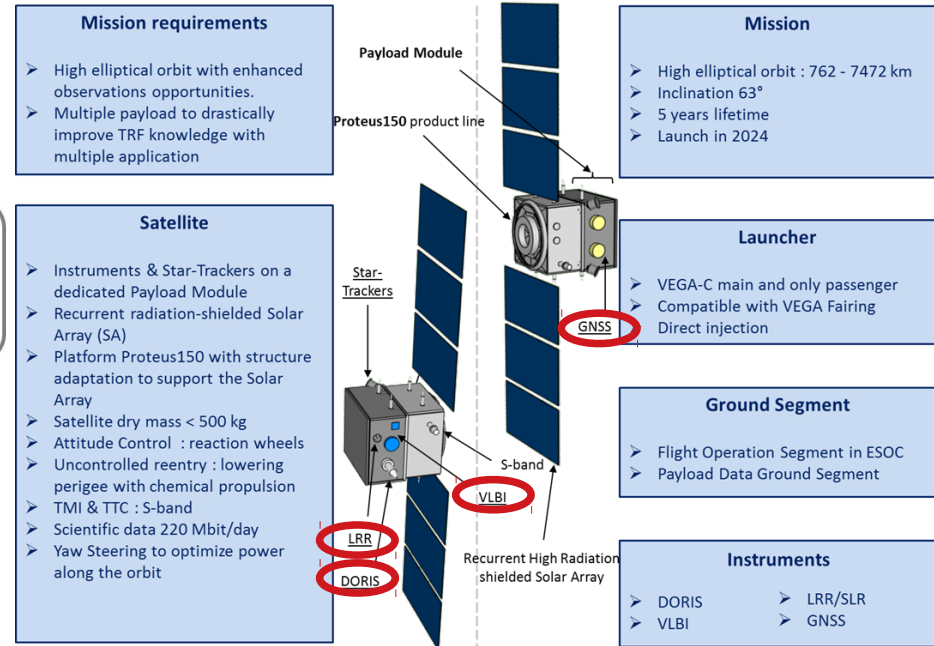
- 
- “**To achieve the GGOS program goals and support future high-precision geodetic science, the ITRF needs to be robust and stable over many decades.** Future scientific objectives drive a **target accuracy of 0.1 millimeters per year** in the realization of the origin of the ITRF relative to the center 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].

Satellite E-GRASP



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



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



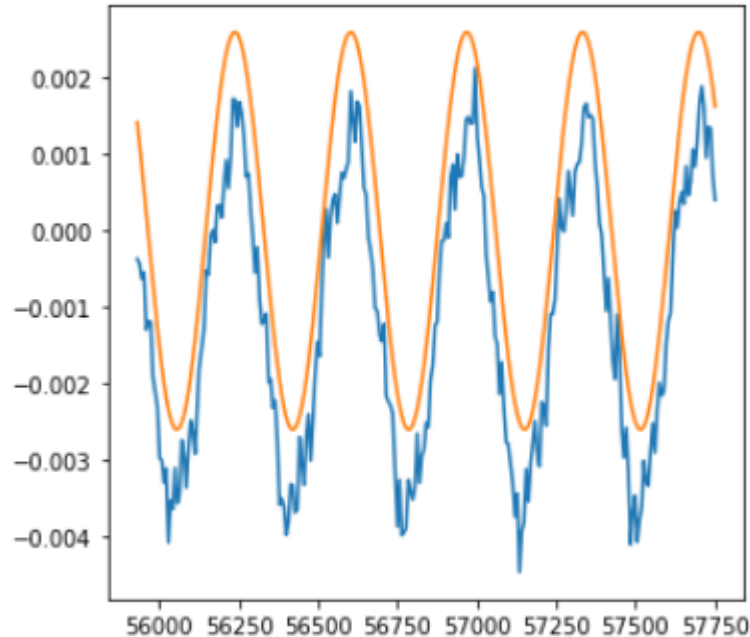
Bundesamt
für Kartographie
und Geodäsie



Résultats de simulations sur E-GRASP

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.

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.

Recommandations :

- Importance des satellites multi-techniques
- Importance de la calibration des instruments à bord des satellites
- Soutien à la mission MARVEL (TRF, Champs de pesanteur, etc.)

