



Géodésie chronométrique

Chronometrical geodesy

Porteur(s) : P. Delva (SYRTE)

Partenaire(s) : G. Lion (SYRTE/LAREG), I. Panet (LAREG), S. Bize (SYRTE), P. Wolf (SYRTE), C. Guerlin (LKB)

Résumé du projet en Français :

La relativité générale d'Einstein prédit que le temps s'écoule différemment pour deux horloges qui ont une vitesse relative et qui sont placées dans des champs gravitationnels différents. Il est donc possible de mesurer une différence de géopotential de gravité en comparant les fréquences de deux horloges. C'est le but de la géodésie chronométrique ou géodésie à base d'horloge. La mission spatiale ACES va mesurer des différences en fréquence relative entre deux horloges au sol avec une exactitude de l'ordre de 10^{-17} . Cela correspond à une différence de géopotential de $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ et à une hauteur de 10 cm entre ces deux horloges. Il est important de comprendre comment les mesures d'horloges peuvent s'intégrer dans l'ensemble des mesures géodésiques classiques (gravimétriques, gradiométriques, altimétriques, ...), et ce que leur spécificité peut apporter de nouveau à la connaissance de notre planète. De plus, les horloges atomiques ne cessent de s'améliorer grâce aux horloges optiques : les meilleures d'entre elles atteignent aujourd'hui une exactitude et une stabilité de fréquence dans la gamme des 10^{-18} , ce qui pourrait donner accès aux variations temporelles du géopotential, particulièrement importantes pour notre compréhension des phénomènes géophysiques.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est d'évaluer l'apport des horloges atomiques pour la détermination du géoïde statique haute résolution, et, en particulier la détermination du géopotential en zone de reliefs. Cette application devrait en effet particulièrement bénéficier du caractère unique et original de mesures ponctuelles et directes de différences de géopotential.

Abstract in English:

Einstein's general relativity predicts that time flows differently for two clocks that have a relative speed and are placed in different gravitational geopotentials. It is therefore possible to measure a gravity geopotential difference by comparing the frequencies of two clocks. This principle is called chronometric geodesy or clock-based geodesy. The ACES space mission will measure differences in relative frequency between two ground clocks with an accuracy of 10^{-17} , corresponding to a geopotential difference of $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$, or 10 cm in term of geoid height. It is important to understand how clock measurements can be integrated into all classical geodetic measurements (gravimetric, gradiometric, altimetric, ...), and what their specificity can bring back to the knowledge of our planet. In addition, atomic clocks are constantly improving thanks to the optical clocks technology. Actually, the best of them can reach an accuracy and a frequency stability of 10^{-18} , which could give access to the temporal variations of the geopotential, particularly important for our understanding of geophysical phenomena.

In this context, the objective of this work is to evaluate the contribution of atomic clocks in order to determine the static geoid part at high spatial resolution, specially in mountain regions. Such an application should particularly benefit from the unique and original nature of local and direct measurements of geopotential differences.

Résultats marquants :

Notre étude, publiée dans Lion et al. (2017), s'est focalisée sur la détermination du géopotential en considérant des régions françaises de moyenne (Massif Central) et haute montagne (Alpes-Méditerranée). Nous avons montré que compléter un réseau de données gravimétriques avec des données de géopotential pouvait permettre d'améliorer significativement la détermination du géopotential à très haute résolution spatiale, au-delà de ce qui est possible de faire avec les satellites (10-100km). A partir de données synthétiques, nous avons montré que quelques dizaines de mesures horloge (à comparer aux milliers de données de gravité utilisées) permettaient d'améliorer d'un facteur 3 la précision sur la reconstruction du géopotential et de réduire le biais de plusieurs ordres de grandeur.

Highlights:

Published in Lion et al. (2017), our study focused on the determination of the geopotential by considering French regions with moderate (Massif Central) and high topography (Alpes-Mediterranean). We have shown that completing a gravimetric data network with geopotential data could significantly improve the geopotential determination at very high spatial resolution (between 10-100km), beyond what it is possible with satellites. From synthetic data, we have shown that a few tens of clock measurements (compare to the thousands of gravity data used) made it possible to improve the precision of the geopotential reconstruction by a factor of 3 and reduce the bias by several orders of magnitude.

Publications and communications linked with the funded project:

Peer-reviewed articles:

- Lion, G., Panet, I., Wolf, P., Guerlin, C., Bize, S., & Delva, P. (2017). Determination of a high spatial resolution geopotential model using atomic clock comparisons. *Journal of Geodesy*, 91(6), 597-611, <http://hal.upmc.fr/hal-01436820>
- Müller J., Dirx D., Kopeikin S. M., Lion G., Panet I., Petit G., Visser P. N. A. M., High Performance Clocks and Gravity Field Determination, *Space Science Reviews*, 2017.

Proceedings:

- Lion G., Delva P., Guerlin C., Bize S., Coulot D., Wolf P., Panet I., Recent advances in the determination of a high spatial resolution geopotential model using chronometric geodesy, *Rencontres de Moriond*, 25 mars - 1 avril, La Thuile - Italie, 2017.

Oral communications:

- Lion G., Guerlin C., Bize S., Wolf P., Delva P., Panet I., *Recent advances in the determination of a high spatial resolution geopotential model using chronometric geodesy*, *EGU General Assembly*, avril, Vienne, Autriche, 2016.
- Lion G., Panet I., Delva P., Bize S., Wolf P., Guerlin C., *Contribution des horloges optiques pour la détermination du géopotential à haute résolution spatiale*, 25ème Journées de la Recherche, 24 mars, Marne la Vallée - France, 2016.
- Lion G., Panet I., Delva P., Bize S., *Géodésie chronométrique : vers un modèle de géopotential haute résolution*, *Colloque Géodésie-Géophysique (G2)*, 16-18 novembre, Toulouse - France, 2015.
- P. Delva, N. Puchades, and J. Lodewyck, 'Chronometric geodesy and fundamental physics', presented at the 2016 AGU Fall Meeting, Session G53A: Relativistic geodesy and quantum sensors for geodesy, San Francisco, U.S., 2016.
- P. Delva, 'Optical clocks and geodesy', presented at the 32eme reunion de la commission GEOPOS. ENSG, Marne-la-Vallee, France, Mar-2017.
- P. Delva, 'Les horloges atomiques: tests de la relativite et geodesie chronometrique', presented at the Ecole Nationale des Sciences Geographiques, Marne la Vallee, Feb-2017.
- P. Delva, 'Applying and testing chronometric Geodesy', presented at the Séminaire Temps & Fréquence SYRTE, Observatoire de Paris, Paris, France, Feb-2016.
- P. Delva, 'Tests de la gravitation et géodésie chronométrique', presented at the Séminaire du laboratoire Leprince-Ringuet, école Polytechnique, Palaiseau, France, Sep-2015.

- P. Delva, 'Chronometric Geodesy and new tests of the Gravitational Redshift', presented at the Séminaires du LAPP, LAPP, Annecy, France, May-2015.

Invited talks:

- Panet, I., G. Lion, C. Guerlin, S. Bize, P. Wolf, and P. Delva. 'Clocks-Based Potential Determination: Complementarity with Existing Gravity Data and Interest in Geoscience'. presented at the ISSI/HISPAC Workshop on 'High Performance Clocks, with Special Emphasis on Geodesy and Geophysics and Applications to Other Bodies of the Solar System', November 30-December 4, 2015, Bern, Switzerland, December 2015.

- P. Delva, 'Chronometric geodesy: methods and applications', presented at the Relativistic Geodesy: Foundations and Applications 609. WE-Heraeus-Seminar Physikzentrum Bad Honnef, Bad Honnef, Germany, Mar-2016.

- P. Delva, 'Chronometric Geodesy', presented at the WG-ATFT, Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF), Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Sèvres, France, Sep-2015.

- P. Delva, 'Atomic clocks on the ground and in space: towards chronometric geodesy and new tests of the gravitational redshift', presented at the Rencontres de Moriond, Gravitation: 100 years after GR, March 21-28, 2015, La Thuile, Italy, Mar-2015.

- P. Delva, 'Géodésie Chronométrique', presented at the Journées Scientifiques de l'Action Spécifique GRAM, 02-03 June, 2016 APC, University Paris Diderot, France, Jun-2016.

- P. Delva, 'Géodésie chronométrique et systèmes de référence', presented at the Journée commémorative des 30 ans de la première réalisation du Système international de référence terrestre par Géodésie spatiale, IGN, Paris, France, Jun-2015.

Others:

- Lion G., Panet I., Delva P., Coulot D., Wolf P., Bize S., Christine G., Clock measurements to improve the geopotential determination, Poster, EGU General Assembly, Avril, Vienne, Autriche, 2017.

- Lion G., Guerlin C., Bize S., Wolf P., Delva P., Panet I., Recent advances in the determination of a high spatial resolution geopotential model using chronometric geodesy, Poster, Journées GRAM, 2-3 juin, Paris, 2016.

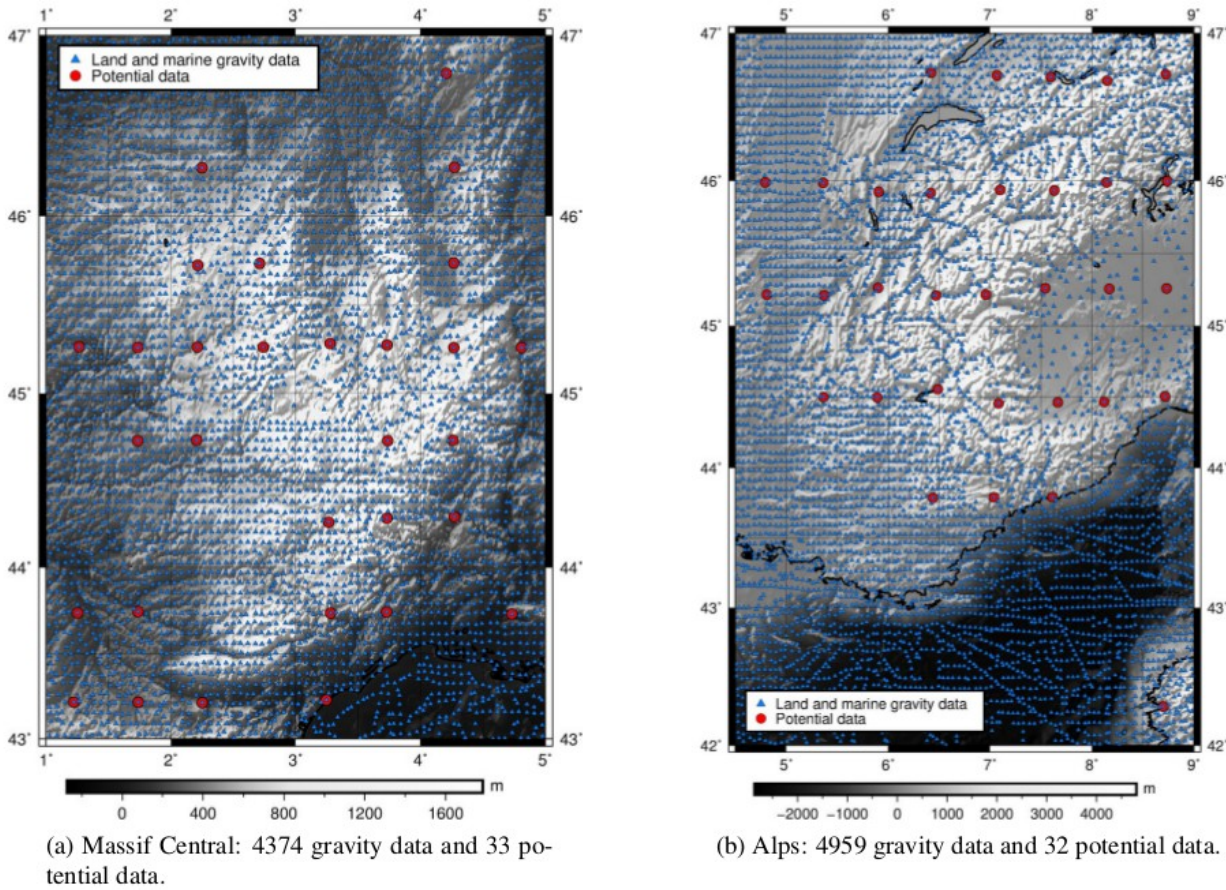
- Lion G., Delva P., Guerlin C., Bize S., Wolf P., Panet I., Benefits of optical clocks for high spatial resolution geopotential determination, Poster, AGU Fall Meeting, 12 - 16 décembre, San Francisco, US, 2016.

- Lion G., Guerlin C., Bize S., Holschneider M., Wolf P., Pajot-Métivier G., Delva P., Panet I., Towards a high resolution geopotential model using clock-based geodesy, 26th IUGG General Assembly, 22 juin - 2 juillet, Prague - République tchèque. 2015.

- Lion G., Guerlin C., Bize S., Holschneider M., Wolf P., Pajot-Métivier G., Delva P., Panet I., Towards a High Resolution Geopotential Model Using Chronometric Geodesy, Rencontres de Moriond, Gravitation: 100 years after GR, 21 - 28 mars, La Thuile – Italie, 2015.

Pictures with captions (curve, photo, scheme ...):

Figure 1:



Distribution of the gravity and clock data used in the synthetic tests.

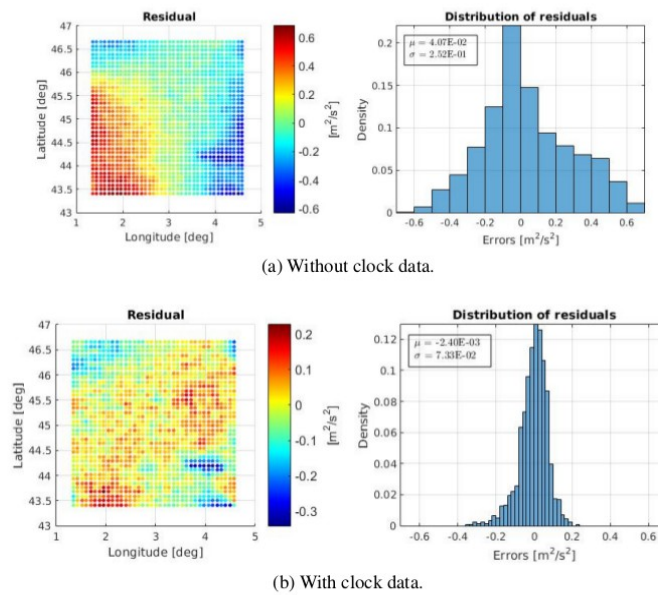
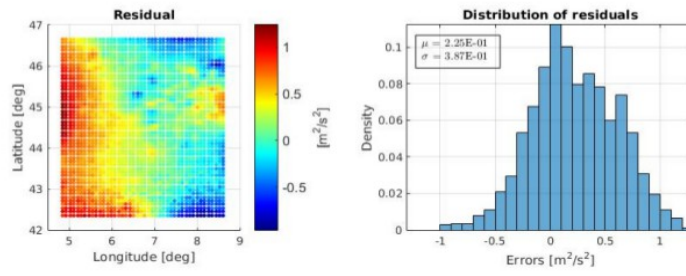
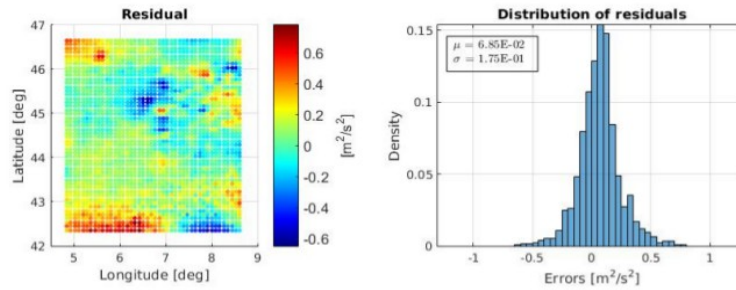


Figure 2: Accuracy of the disturbing potential T reconstruction on a regular 10-km step grid in Massif Central, obtained by comparing the reference model and the reconstructed one. In Figure (a), the estimation is realized from the 4374 gravimetric data δg only, and in Figure (b) by adding 33 potential data T to the gravity data.



(a) Without clock data.



(b) With clock data.

Figure 3: Accuracy of the disturbing potential T reconstruction on a regular 10-km step grid in the Alps obtained by comparing the reference model and the reconstructed one. In Figure (a), the estimation is realized from the 4959 gravimetric data δg only, and in Figure (b) by adding 32 potential data T to the gravity data.