

Premières mesures françaises de gravimétrie absolue dans les régions polaires Antarctique (terre Adélie) et Arctique (Spitzberg)

Jacques Hinderer*, Martine Amalvict, Bernard Luck

EOST-IPGS (CNRS-ULP UMR 7516), 5, rue René-Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France

Reçu le 12 février 2002 ; accepté le 9 juillet 2002

Présenté par Jean-Louis Le Mouél

Abstract – First French measurements of absolute gravity in the Antarctic (Terre Adélie) and Arctic (Spitsbergen) polar regions. This study is devoted to the first French determinations of absolute gravity in the Antarctic (Dumont-d'Urville, Terre Adélie) and Arctic (Ny-Alesund, Spitsbergen) polar regions. The measurements in Dumont-d'Urville were performed in 2000 with the help of the FG5#206 absolute gravimeter belonging to the French geodetic community since beginning 1997; they show a strong noise that causes an uncertainty close to 11 μGal in the determination of the mean gravity value, which will be compared, to a new determination planned for 2005. The Ny-Alesund measurements show on the contrary a noise that, although very variable in time, leads to a gravity determination of better than 5 μGal . The comparison of our value with a previous one two years before suggests a gravity decrease of about 4 μGal which is related to the vertical uplift measured by Very Large Baseline Interferometry (VLBI) at the same site. However, the uncertainty does not allow discriminating between height-to-gravity conversion factors originating from different models. *To cite this article: J. Hinderer et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 819–826.*

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

absolute gravimetry / Very Large Baseline Interferometry (VLBI) / Antarctic and Arctic polar regions

Résumé – Cette étude est consacrée aux premières mesures françaises de gravimétrie absolue effectuées dans les régions polaires en Antarctique (Dumont-d'Urville, terre Adélie) et en Arctique (Ny-Alesund, Spitzberg), qui ont été réalisées en 2000 à l'aide du gravimètre absolu FG5#206 acquis par la communauté gravimétrique française au début 1997. Les mesures faites à Dumont-d'Urville, d'une durée totale de 118 h, sont fortement bruitées, ce qui implique une incertitude proche de 11 μGal sur la valeur moyenne de la pesanteur ; cette valeur sera à comparer à une nouvelle détermination prévue en 2005. Les mesures faites à Ny-Alesund, d'une durée totale de 174 h, sont au contraire entachées d'un bruit très variable et permettent de déterminer la pesanteur à mieux que 5 μGal . La comparaison de notre valeur avec celle obtenue deux ans plus tôt avec un instrument similaire suggère une diminution de la gravité de 4 μGal , qui peut être reliée au soulèvement vertical mesuré par la technique d'interférométrie à très longue base (VLBI). L'incertitude ne permet cependant pas de discriminer entre plusieurs facteurs de conversion altitude/gravité provenant de modèles différents. *Pour citer cet article : J. Hinderer et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 819–826.*

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

gravimétrie absolue / interférométrie à très longue base (VLBI) / régions polaires Antarctique et Arctique

Abridged version

1. Introduction

The French geodetic community acquired at the beginning of 1997 an absolute gravimeter of the new generation

(AG model FG5#206), built by Micro-g Solutions Inc. (USA). The main site of operation of this instrument is the Strasbourg gravimetric station where are also located a superconducting gravimeter (SG model C026) belonging to the GGP network [9, 10] and a continuous GPS receiver. Regular recordings in parallel between the absolute and

* Correspondance et tirés à part.
Adresse e-mail : jhinderer@east.u-strasbg.fr (J. Hinderer).

cryogenic gravimeters are performed in order to check the time stability of the calibration factor of the relative instrument [11] as well as its long-term behaviour [5]. The high accuracy and sensitivity of the FG5 of the order of 1–2 μGal (10^{-8} m s^{-2}) [16] allow us to detect small gravity changes due to tidal oceanic loading [13, 15, 17] or due to the polar motion [1–3, 5]. Another important application of absolute gravimetry is its use in tectonic problems with a strong vertical motion, as it is the case in post-glacial rebound studies [14]. In addition to our observatory activity in Strasbourg, one of the tasks of FG5#206 is to perform absolute gravity measurements in France and in foreign countries according to existing cooperation programs or research grants.

We show here the first measurements of absolute gravity done by a French team in the Antarctic and Arctic regions, respectively in the spring and summer of 2000. The Antarctic station is Dumont-d'Urville (DDU, Terre Adélie) with coordinates 66.67°S and 140.17°E; the Arctic station is Ny-Alesund (NYAL, Spitsbergen) with coordinates 78.29°N and 11.915°E (see Fig. 1).

2. Measurements in Antarctica (Dumont-d'Urville, Terre Adélie)

In the framework of a scientific program of the IFRTIP (Institut français pour la recherche et la technologie polaire), the summer campaign of the 50th polar expedition in Dumont-d'Urville (Terre Adélie) brought the opportunity to perform the first absolute gravity measurements from 26 February to 2 March 2000. These measurements were done in a shelter on a pillar, leading to a total length of 118 h and 11 800 individual drops (one drop every 10 s and one set of 25 drops every 15 min). As usually, the raw gravity values are corrected for tidal effects (solid earth tides + ocean loading), air pressure effects (using local pressure observations) and polar motion contribution. The vertical gravity gradient ($-3.82 \pm 0.03 \mu\text{Gal cm}^{-1}$) is measured by a Scintrex micro-gravimeter; the uncertainty of the order of 1% affects of course the transfer of the final gravity value from the instrumental height to the ground, but has no influence on the search for gravity changes in time, since the same gradient is always used.

Fig. 2 shows the scatter of hourly single set values around the final mean value $g = 982\,387\,174.2 \pm 11.1 \mu\text{Gal}$; the uncertainty is here the standard deviation of the histogram of the set values around the mean and is rather high for this type of measurements, essentially because of bad weather conditions (strong winds) and the vicinity of the ocean [4]. In addition to this first gravity determination, several gravimetric links were performed (inside the French territory, but also between DDU and Hobart, Australia); this last one is especially important for marine geophysics campaigns in this region. The DDU site will be re-occupied again in 2005; despite the high uncertainty of our measurements, we hope that the repetition will provide an additional independent constraint in order to discriminate between the large uplift superior

to 1 cm yr^{-1} , which could be retrieved there from GPS measurements [6] and which would lead to more than 15 μGal change in 5 yr, and the weak subsidence seen by the DORIS space-geodesy system [21] at the same station, which would lead to a gravity change (in the opposite sense) more than 10 times smaller. Further repetitions will be necessary to confirm the long-term gravity trend, if any.

3. Measurements in the Arctic (Ny-Alesund, Norway)

The absolute gravity measurements in the Arctic were done in Spitsbergen (Norway) from 18 to 25 July 2000, thanks to the support of a European grant LSF (Large Scale Facility), involving cooperation between EOST, Strasbourg and NMA (Norwegian Mapping Authority), Norway. The scientific motivation was twofold: first, to calibrate accurately the superconducting gravimeter CT#39 installed there by a Japanese team since fall 1999 and which belongs to the GGP network [20]; second, to obtain a new gravity value and to compare it to a previous determination done two years before at the same location with a similar instrument by a German team. The measurement sequence is one drop every 10 s and a set of 49 drops every half hour. The full duration is 174 h, distributed in 349 sets. Fig. 3 shows the gravimetric station in Ny-Alesund (Spitsbergen) with the superconducting gravimeter CT#39 and our FG5#206 a few meters apart.

A vertical gradient value of $-3.57 \pm 0.03 \mu\text{Gal cm}^{-1}$ as measured in 1998 is used in order to do an homogeneous processing of the 1998 and 2000 data; our determination in 2000 shows a good stability of this value.

The dispersion of the hourly set values around the mean is indicated in Fig. 4A, while the error bars shown in Fig. 4B clearly show the strong noise increase after the first 60 h caused by a degradation of the weather conditions. Applying all the standard corrections for the temporal gravity changes, we find $g = 983\,017\,055.1 \pm 7.0 \mu\text{Gal}$. If we only keep the first 60 h, the final g value is then $g = 983\,017\,055.9 \mu\text{Gal}$ (increase of 0.8 μGal), but the error bar is reduced from 7.0 to 4.4 μGal . Taking this last value and comparing it to the 1998 value (also originating from a 60-h record and identical processing), which has an uncertainty of 1.2 μGal , indicates a gravity decrease of $4.1 \pm 4.6 \mu\text{Gal}$ in two years. This difference is statistically not significant, but a third measurement in 2001 confirms this gravity decrease [19], which is clearly related to the present-day uplift determined by Very Large Baseline Interferometry (VLBI) measurements at the same location, with a rate of $5.7 \pm 1.8 \text{ mm yr}^{-1}$ [7].

In Fig. 5, we compare the VLBI vertical displacement (in mm) to the displacement inferred from our gravity change according to different conversion factors: the free-air-gradient hypothesis ($-0.305 \mu\text{Gal mm}^{-1}$) (geometrical effect due to the altitude change), the Bouguer gradient ($-0.2 \mu\text{Gal mm}^{-1}$), which takes into account in addition to the free air effect the vertical displacement of the

crust (with a density of $2.6 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$), and finally the factor ($-0.15 \text{ } \mu\text{Gal mm}^{-1}$) from a visco-elastic rheological model [12, 23] (viscous mantle and elastic lithosphere).

Several remarks have to be pointed out:

- the VLBI uplift corresponds to a gravity decrease and this is what our data show;
- the uplift induced from our measured gravity change in the free air model is compatible with the VLBI observations;
- the uplift induced from our measured gravity change according to either the Bouguer or the visco-elastic model is larger than what is observed by the VLBI.

The value of the observed rebound at Ny-Alesund by VLBI is much larger than the prediction [18]; this means that any further interpretation will need to take into account other phenomena such as local active tectonics and the impact of inter-annual surface loads (atmospheric pressure, oceans and deglaciation).

These results have to be taken with care because of the short time interval (2 years) and also because of the uncertainty on the absolute gravity determinations. In particular, no firm conclusion can be derived concerning the type of conversion factors between gravity and height. A similar study combining GPS and absolute gravimetry in Greenland [22] has shown the interest of co-located measurements of this type in order to be able to separate the post-glacial rebound contribution of visco-elastic origin

from the present-day deglaciation effects. These ones are essential for a better understanding of the mean sea level changes that are observed [8].

4. Conclusion

We have shown in this study the first absolute gravity measurements done by a French team in the Antarctic and Arctic polar regions. The 118-h long measurements done in Dumont-d'Urville (Terre Adélie) reveal a constant strong noise due to the proximity of the ocean as well as to the weather conditions and lead to a final gravity determination with an $11 \text{ } \mu\text{Gal}$ uncertainty. The repetition of these measurements in 2005 will be interesting in the debate existing between the large uplift seen by GPS and the subsidence seen by DORIS at this station. The 174-h measurements done in the NY-Alesund station in the Arctic show a time-varying noise; keeping only the first 60 hours at the beginning allows to determine g with an uncertainty of about $4 \text{ } \mu\text{Gal}$. The comparison of this value with the gravity value obtained in 1998 by another team using a similar instrument exhibits a gravity decrease of about $4 \text{ } \mu\text{Gal}$ in two years, which is related to the uplift observed at the same site by VLBI. However, the present uncertainty on this decrease does not allow discriminating between several height-to-gravity conversion factors originating from different models. Repeated measurements are needed to further confirm this long-term gravity evolution.

1. Introduction

La communauté gravimétrique française a acquis au début de 1997 un gravimètre absolu de la dernière génération (modèle FG5#206) construit aux États-Unis par Micro-g Solutions Inc. Le site principal d'accueil de cet instrument est le site de l'observatoire gravimétrique de Strasbourg, qui abrite, depuis 1987, un gravimètre supraconducteur (ainsi que de nombreux capteurs auxiliaires d'environnement) et, depuis novembre 1999, un récepteur permanent GPS. Ce gravimètre supraconducteur fait partie du réseau international composé d'instruments similaires, appelé GGP (*Global Geodynamics Project*), dont les objectifs scientifiques sont variés et intéressent de nombreux aspects de la géodynamique globale [9, 10]. Le gravimètre absolu est un instrument portable et nous sommes chargés, à l'EOST de Strasbourg, d'effectuer les missions de mesure absolue de pesanteur en France et à l'étranger. Parmi les applications possibles de cet instrument, nous pouvons citer la réfection (ou l'extension) du réseau gravimétrique national, l'établissement de lignes d'étalonnage pour micro-gravimètres, l'étalonnage précis d'instruments relatifs, notamment celui des gravimètres à supraconductivité [11] et la détermination de la référence

verticale (en complémentarité des mesures de positionnement précises). La répétabilité du gravimètre absolu FG5 est de l'ordre du μGal (10^{-8} m s^{-2}) et son exactitude de $1\text{--}2 \text{ } \mu\text{Gal}$ [16]. Ces valeurs très faibles en font un outil privilégié dans l'étude des phénomènes s'accompagnant de faibles variations de gravité, comme la surcharge de marée océanique en zone côtière [13, 15, 17] ou la marée polaire consécutive au mouvement du pôle de rotation terrestre [1–3, 5]. Un autre intérêt est son utilisation dans les problèmes de tectonique, qui induisent une forte composante de déplacement vertical (tectonique active ou rebond post-glaciaire) [14]. En effet, comme le gradient vertical de gravité à la surface terrestre (appelé à l'air libre) est voisin de $3 \text{ } \mu\text{Gal cm}^{-1}$, la précision de l'instrument permet (via ce facteur de conversion) d'accéder en principe à une précision d'estimation du déplacement vertical de 3 mm , c'est-à-dire voisine de celle des meilleures techniques de positionnement de géodésie spatiale, comme le GPS, le VLBI, DORIS ou l'interférométrie laser (LLR ou SLR). Cependant, il ne faut pas perdre de vue le fait que tout gravimètre est sensible aux effets directs d'attraction gravitationnelle, qui se superposent, dans certains cas, aux effets de déformation verticale mentionnés ci-dessus. En réalité, c'est la combinaison des

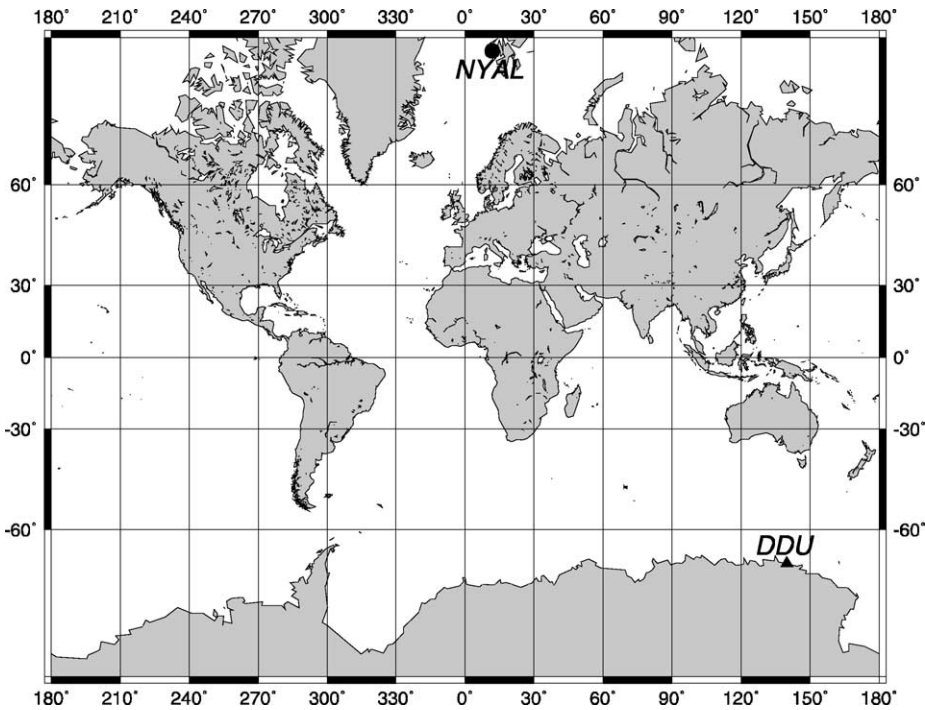


Figure 1. Localisation géographique des stations de Dumont-d'Urville en Antarctique (terre Adélie) et de Ny-Alesund en Arctique (Spitzberg).

Figure 1. Geographical location of the Dumont-d'Urville station in Antarctica (Terre Adélie) and the Ny-Alesund station in the Arctic (Spitsbergen).

deux techniques qui apportera le plus de contraintes au phénomène étudié ; c'est pour cette raison que les mesures en co-localisation se développent de manière quasi-systématique.

Nous présentons ici les premières mesures de gravité absolue effectuées par une équipe française en Antarctique et en Arctique. Ces deux missions ont eu lieu en 2000, celle de terre Adélie en mars-avril et celle du Spitzberg en juillet. Les coordonnées géographiques de la station de Dumont-d'Urville (DDU) sont 66,67°S, 140,17°E, celles de Ny-Alesund (NYAL) au Spitzberg 78,929°N et 11,915°E (Fig. 1).

2. Mesures en Antarctique (Dumont-d'Urville, terre Adélie)

La campagne d'été de la 50^e expédition polaire à Dumont-d'Urville (terre Adélie) a permis d'effectuer les premières mesures absolues de pesanteur dans le cadre d'un programme de recherches de l'IFRTP (Institut français pour la recherche et la technologie polaire). L'escale a eu lieu du 26 février au 2 mars 2000 et a permis une durée totale d'expérience de 118 h et 11 800 chutes individuelles (à raison d'une chute toutes les 10 s et d'une série de 25 chutes toutes les 15 min). Les mesures ont eu lieu sur un pilier, à l'intérieur d'un abri, afin de réduire les effets de température et de vent. Les valeurs brutes de pesanteur sont corrigées selon une procédure classique, qui élimine les variations temporelles de la gravité causées par la marée solide, la surcharge de marée océanique, la pression atmosphérique et le mouve-

ment du pôle de rotation de la Terre. En utilisant la valeur du gradient vertical de gravité mesuré à l'aide d'un micro-gravimètre Scintrex CG3-M ($-3,82 \pm 0,03 \mu\text{Gal cm}^{-1}$), les valeurs sont transférées de la hauteur instrumentale au niveau du sol. L'incertitude sur ce gradient se répercute directement dans le transfert de la valeur au sol, mais cela n'affectera pas le calcul de la variation de pesanteur lors de la réoccupation du site, car la même valeur de gradient sera prise en compte.

Une première étude des séries brutes est présentée dans la référence [4]. La Fig. 2 montre la dispersion, au cours du temps, des valeurs moyennes horaires de pesanteur à DDU autour de la valeur finale de la gravité, qui est :

$$g = 982\,387\,174,2 \pm 11,1 \mu\text{Gal}$$

L'incertitude de 11,1 μGal sur la valeur finale de gravité est l'écart type des mesures horaires ; cette valeur est élevée à cause de plusieurs facteurs d'environnement, tels que le fort vent et la houle océanique, du fait de la proximité du point de mesure avec la mer ; l'incertitude moyenne de détermination de g chute par chute est de 57,5 μGal et cette valeur a été très constante pendant la durée totale des mesures, au contraire des mesures au Spitzberg.

Plusieurs rattachements gravimétriques ont aussi pu être effectués dans le cadre de cette mission, en particulier entre la station de gravité absolue et le marégraphe, mais aussi entre DDU et la Tasmanie (Hobart). Ce dernier rattachement est particulièrement important pour les campagnes de gravimétrie marine dans l'océan Indien.

Mesures absolues de pesanteur à Dumont d'Urville (Antarctique)
(26 février au 2 mars)

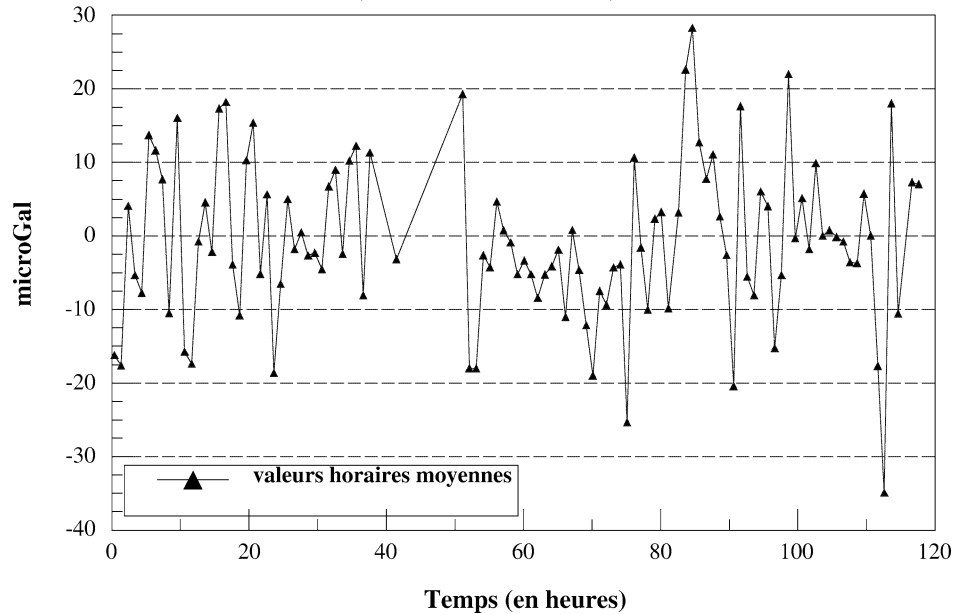


Figure 2. Variations des valeurs horaires de gravité en fonction du temps (26 février–2 mars 2000) autour de la valeur moyenne observée $g = 982\,387\,174,2 \mu\text{Gal}$ à la station de Dumont-d'Urville en terre Adélie.

Figure 2. Hourly values of gravity around the mean value $g = 982\,387\,174,2 \mu\text{Gal}$ as observed at the Dumont-d'Urville station (Terre Adélie) (26 February–2 March 2000).

En plus de l'intérêt propre de ces premières mesures absolues en terre Adélie et des rattachements mentionnés ci-dessus, il est prévu de ré-occuper le même site en 2005, afin d'étudier dans cette zone les éventuelles variations de gravité à long terme. En effet, cette zone est du plus grand intérêt pour les études de rebond post-glaciaire de nature visco-élastique et/ou les effets de déglaciation actuels. Une étude récente des données GPS en Antarctique [6] a montré une vitesse de relèvement vertical élevée supérieure à 1 cm an^{-1} , alors que des mesures DORIS conduisent plutôt à une légère subsidence de $-0,7 \text{ mm an}^{-1}$ [21]. La réoccupation du site en 2005, avec un gravimètre absolu de précision accrue à la suite d'une modification instrumentale, apportera une contrainte supplémentaire indépendante et devrait permettre de discriminer entre ces deux résultats de positionnement contradictoires ; en effet, même si nos incertitudes de mesure sont élevées, un mouvement supérieur à 1 cm an^{-1} (solution GPS) doit conduire à une variation de plus de $15 \mu\text{Gal}$ en cinq ans, alors que la solution DORIS doit, au contraire, conduire à une variation de pesanteur plus de dix fois plus faible (de sens opposé). Par la suite, il faudra d'autres répétitions pour confirmer la première tendance qui se dégagera.

3. Mesures en Arctique (Ny-Alesund, Norvège)

La campagne de mesures absolues au Spitzberg (Norvège) s'est déroulée du 18 au 25 juillet 2000.

Elle a été effectuée dans le cadre d'un programme européen appelé LSF (*Large Scale Facility*), qui permet de promouvoir la recherche scientifique en Arctique. La motivation était double : d'une part, étalonner un gravimètre à supraconductivité (modèle CT#039) installé à l'automne 1999 par les Japonais, en coopération avec les Norvégiens, à Ny-Alesund au Spitzberg, qui est la station du réseau GGP de plus haute latitude [20] ; d'autre part, obtenir une nouvelle détermination de la pesanteur absolue et la comparer à celle obtenue par une équipe allemande en 1998 avec le même type d'instrument et au même endroit. La Fig. 3 montre l'intérieur de la station gravimétrique et indique l'emplacement des gravimètres absolu et supraconducteur ; on peut également voir sur le pilier, au premier plan, un micro-gravimètre Scintrex CG3-M, qui est utilisé pour mesurer le gradient vertical de gravité. La valeur du gradient vertical mesuré en 1998 ($-3,57 \pm 0,03 \mu\text{Gal cm}^{-1}$) est utilisée dans le transfert au sol et, comme on l'a discuté dans le §2, cette valeur est prise identique pour un traitement homogène des données en 1998 et en 2000. Nos propres mesures en 2000 montrent d'ailleurs une grande stabilité de ce gradient.

Le protocole de mesures consiste en une chute toutes les 10 s et une série continue de 49 chutes par demi-heure. La longueur totale d'enregistrements en parallèle avec le gravimètre supraconducteur est de 174 h (349 séries).

La Fig. 4A représente les variations de gravité horaires (en μGal) autour de la valeur moyenne finale ; on peut aisément voir sur la Fig. 4B, qui indique l'évolution temporelle des incertitudes sur ces valeurs



Figure 3. Intérieur de la station gravimétrique de Ny-Alesund (Spitzberg) où se sont déroulées nos séries de mesures avec le gravimètre absolu FG5#206, en parallèle avec le gravimètre à supraconductivité CT#39.

Figure 3. Gravimetric station of Ny-Alesund (Spitsbergen) where were performed the measurements with the absolute gravimeter FG5#206 in parallel with the superconducting gravimeter CT#39.

de gravité, que, contrairement aux conditions en Antarctique, qui sont restées médiocres pendant toute la mission, elles ne se sont dégradées qu'après 60 h, ceci étant dû à un accroissement du vent (et de la houle océanique) ; les mesures horaires sur la durée totale ont un écart type de $7,0 \mu\text{Gal}$ et conduisent à une valeur de g de $983\,017\,055,1 \pm 7,0 \mu\text{Gal}$; l'incertitude chute par chute est de $23 \mu\text{Gal}$.

En ne conservant que la période initiale de 60 h où le bruit est minimal, la valeur moyenne de la gravité est la suivante :

$$g = 983\,017\,055,9 \pm 4,4 \mu\text{Gal}$$

Cette valeur implique une diminution de la gravité de $4,1 \mu\text{Gal}$ par rapport à la valeur trouvée en 1998 au même endroit, avec une incertitude de $1,2 \mu\text{Gal}$, par une équipe allemande (BKG, Francfort), qui opérait avec un gravimètre absolu du même constructeur. En prenant en considération les incertitudes des deux mesures, il apparaît que la diminution de gravité n'est pas significative ($4,1 \pm 4,6 \mu\text{Gal}$), mais une mesure plus récente effectuée en 2001 confirme cette décroissance

Mesures absolues de la pesanteur à Ny-Alesund (Spitzberg) (18 au 25 juillet 2000)

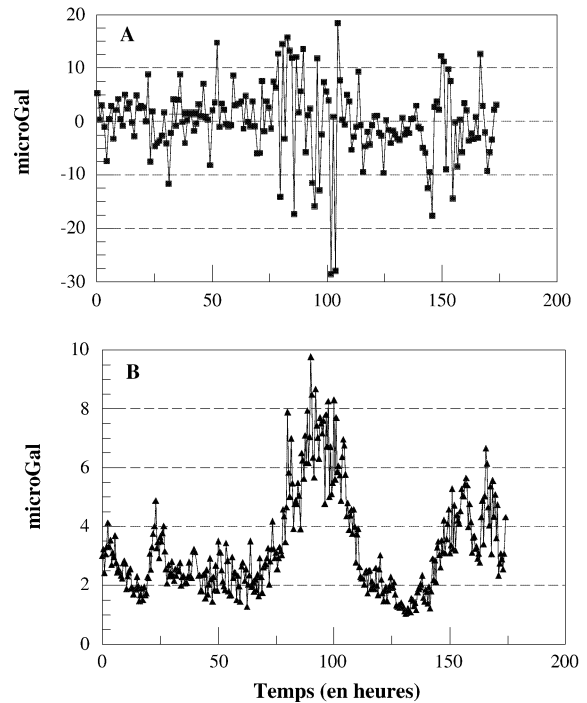


Figure 4. Variations des valeurs de gravité à la station de Ny-Alesund (Spitzberg) en juillet 2000 ; (A) représente la dispersion au cours du temps des valeurs horaires de gravité autour de la moyenne et (B) l'incertitude correspondant aux mesures (A) ; on constate la nette dégradation après environ 60 h de mesures.

Figure 4. Gravity changes observed at the Ny-Alesund station (Spitsbergen) in July 2000 ; (A) is the scatter of the hourly values around the mean value and (B) the uncertainty of these values ; one can notice the clear noise increase after the first 60 h of measurements.

[19]. Nous avons effectué plusieurs tests de sensibilité des résultats en fonction de la longueur d'observation et des types de corrections de marée (solide et océanique). Ces tests conduisent à une incertitude sur g qui est inférieure au μGal . Le site de Ny-Alesund est particulièrement intéressant pour étudier les effets à long terme en gravité et en positionnement, car il existe une antenne d'interférométrie à très longue base (VLBI) en fonctionnement permanent. Le relèvement actuel vu par cette technique est de $5,7 \pm 1,8 \text{ mm an}^{-1}$ [7].

Nous avons transformé la variation de gravité en variation de déplacement vertical en faisant plusieurs hypothèses de conversion :

- le gradient à l'air libre, $-0,3 \mu\text{Gal mm}^{-1}$, où seule intervient la modification d'altitude (contribution géométrique) ;
- le gradient de Bouguer, $-0,2 \mu\text{Gal mm}^{-1}$, qui tient compte, en plus de l'effet à l'air libre, du déplacement vertical de la croûte (avec une densité de $2,6 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$) (effet de plateau) ;

NY-ALESUND (SPITZBERG)

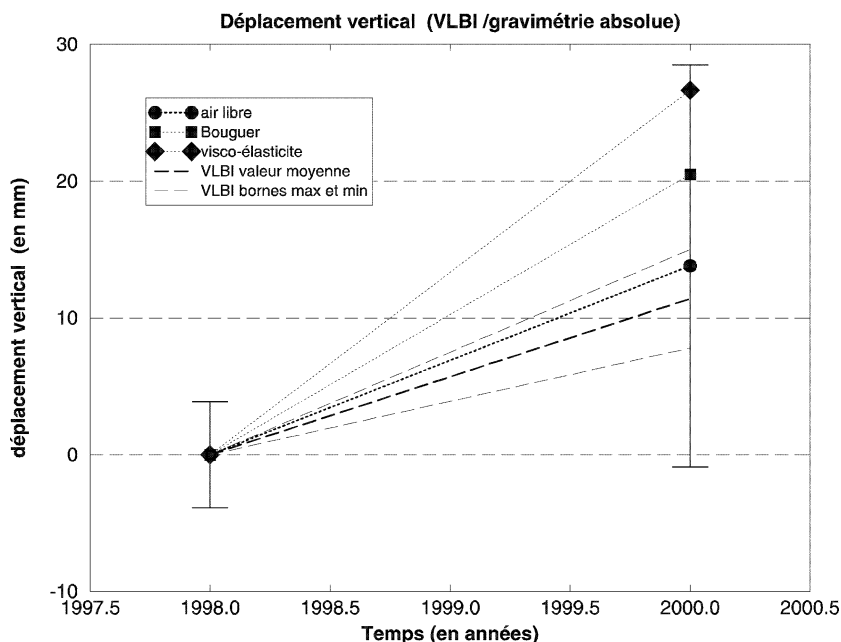


Figure 5. Comparaison du déplacement vertical entre 1998 et 2000 déterminé par le VLBI et celui déduit de la gravimétrie absolue à partir de plusieurs facteurs de conversion gravité/altitude.

Figure 5. Comparison of the vertical displacement between 1998 and 2000 determined by VLBI measurements and the one inferred from the absolute gravity changes according to different gravity/height conversion factors.

– le facteur $-0,15 \mu\text{Gal mm}^{-1}$, proposé par [12] et [23], qui correspond à une rhéologie de type visco-élasticité (manteau visqueux et lithosphère élastique), utilisée dans l'étude du rebond post-glaciaire.

Les résultats de la Fig. 5 appellent plusieurs remarques :

– le relèvement vu par le VLBI correspond à une diminution de gravité ; c'est ce que nos mesures montrent effectivement ;

– le relèvement déduit de la gravimétrie avec l'hypothèse du gradient à l'air libre est compatible avec le relèvement observé par VLBI en tenant compte des incertitudes ;

– les relèvements déduits avec les hypothèses du gradient de Bouguer et, a fortiori, du modèle de rebond visco-élastique, conduisent à une valeur plus forte que celle du VLBI.

Signalons également que la valeur observée par VLBI du relèvement à Ny-Alesund est très supérieure à la valeur prédite du rebond post-glaciaire [18], ce qui signifie qu'il faudra tenir compte, dans toute tentative d'interprétation, d'autres phénomènes, tels que la tectonique active locale, mais aussi l'impact des variations inter-annuelles des charges en surface (entre autres, la pression atmosphérique, les océans et les glaciers).

Il faut prendre ces résultats avec précaution au vu de la courte séparation en temps (deux ans) entre les deux mesures de gravité absolue et, surtout, à cause de l'incertitude de ces mesures, en particulier la dernière. Aucune conclusion ne peut être donnée quant à la compatibilité ou l'incompatibilité des différents

gradients (sachant que celui à l'air libre est le moins probable) ; stricto sensu, une absence de relèvement n'est pas impossible d'un point de vue gravimétrique. Une étude similaire combinant mesures GPS et gravimétrie absolue au Groenland [22] montre également l'intérêt de telles mesures en co-localisation pour étudier le problème de la séparation entre la déformation visqueuse due au relèvement post-glaciaire et la déformation élastique consécutive à des changements actuels de la couverture glaciaire. Ces changements de masse des glaciers sont un élément essentiel dans notre compréhension de l'évolution du niveau moyen des océans qui est observée par ailleurs [8].

4. Conclusion

Nous avons présenté, dans cette étude, les premières mesures françaises absolues de pesanteur effectuées dans les régions polaires Antarctique et Arctique. Les mesures faites à la base de Dumont-d'Urville en terre Adélie, d'une durée totale de 118 h, sont entachées d'un bruit important constant, causé par la proximité de l'océan et par les conditions météorologiques ; la valeur finale moyenne de la gravité, après correction des effets de marée solide, de surcharge océanique, de pression atmosphérique et du mouvement du pôle de rotation peut être définie avec une incertitude de $11 \mu\text{Gal}$. La répétition de cette mesure, prévue pour 2005, sera intéressante pour la controverse qui existe entre le fort mouvement vertical observé par GPS et la faible subsidence vue par

DORIS au même endroit. Les mesures faites à Ny-Alesund au Spitzberg, d'une durée totale de 174 h, montrent quant à elles une variabilité importante du bruit, avec une forte dégradation après les premières 60 heures ; en ne conservant que cette période relativement calme, l'incertitude sur la détermination de g est de l'ordre de $4 \mu\text{Gal}$; la comparaison de notre valeur de gravité avec la valeur trouvée en 1998 au même endroit et après un traitement identique montre une

diminution de la gravité de l'ordre de $4 \mu\text{Gal}$ en deux ans, qui peut être reliée au soulèvement actuel mesuré par la technique d'interférométrie à très longue base (VLBI). L'incertitude élevée sur cette diminution ne permet pas pour l'instant de discriminer entre plusieurs facteurs de conversion gravité/altitude relevant de modèles différents. Une répétition de ces mesures est nécessaire pour confirmer cette évolution de la gravité à long terme.

Remerciements. Cette étude est la contribution n° 2002-19-UMR 7516.

Références

- [1] M. Amalvict, J. Hinderer, O. Francis, J. Mäkinen, Comparisons between absolute (AG) and superconducting (SG) gravimeters, in : R. Forsberg, M. Feissel, R. Dietrich (Eds.), *Geodesy on the Move, Gravity, Geoid, Geodynamics, and Antarctica*, IAG Scientific Assembly, IAG Symposia 119 (1998) 24–29.
- [2] M. Amalvict, J. Hinderer, J.-P. Boy, A comparative analysis between an absolute gravimeter (FG5-206) and a superconducting gravimeter (GWR C026) in Strasbourg: new results on calibration and long term gravity changes, *Boll. Geofisica Geodetica* 40 (2–3) (1999) 519–525.
- [3] M. Amalvict, J. Hinderer, J.-P. Boy, P. Gegout, A 3-year comparison between a superconducting gravimeter (GWR C026) and an absolute gravimeter (FG5#206) in Strasbourg (France), *J. Geod. Soc. Jpn* 47 (2001) 334–340.
- [4] M. Amalvict, J. Hinderer, B. Luck, First absolute gravity measurements at the French station Dumont-d'Urville (Antarctica), in : M. Sideris (Ed.), *Gravity, Geoid and Geodynamics 2000*, IAG Symposia 123 (2001) 373–377.
- [5] J.-P. Boy, J. Hinderer, M. Amalvict, E. Calais, On the use of long records of superconducting and absolute gravity observations with special application to the Strasbourg station, France, *Bull. Inf. Marées Terrestres* 133 (2000) 10377–10393.
- [6] M.N. Bouin, *Traitement des données GPS en Antarctique*, thèse, École normale supérieure, Paris, France, 1999.
- [7] J. Campbell, A. Nothnagel, Comparison of European VLBI solutions from different analysis centers, in : P. Tomasi, F. Mantovani, M.-A. Perez-Torres (Eds.), *Proc. 14th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Radioastronomia, Bologna, Italy, 2000, pp. 3–6.
- [8] A. Cazenave, K. Dominh, F. Ponchaut, L. Soudarin, J.-F. Cretaux, C. Le Provost, Sea level changes from Topex–Poseidon altimetry and tide gauges, and vertical crustal motions from DORIS, *Geophys. Res. Lett.* 26 (14) (1999) 2077–2080.
- [9] D. Crossley, J. Hinderer, G. Casula, O. Francis, H.-T. Hsu, Y. Imanishi, G. Jentzsch, J. Kaarianen, J. Merriam, B. Meurers, J. Neumeyer, B. Richter, K. Shibuya, T. Sato, T. van Dam, Network of superconducting gravimeters benefits a number of disciplines, *EOS Trans. AGU* 80 (11) (1999) 121, 125–126.
- [10] J. Hinderer, D. Crossley, Time variations in gravity and inferences on the Earth's structure and dynamics, *Surv. Geophys.* 21 (2000) 1–45.
- [11] J. Hinderer, M. Amalvict, N. Florsch, O. Francis, J. Mäkinen, On the calibration of superconducting gravimeters with the help of absolute gravity measurements, in : B. Ducarme, P. Pâquet (Eds.), *Proc. 13th Int. Symp. Earth Tides*, Brussels, Belgium, 1998, pp. 557–564.
- [12] T.S. James, E.R. Ivins, Present-day Antarctic ice mass changes and crustal motion, *Geophys. Res. Lett.* 22 (1995) 973–976.
- [13] M.-F. Lalancette-Le Quentrec, B. Simon, D. Orseau, N. Florsch, M. Llubes, M. Amalvict, J. Hinderer, Ocean loading and crustal deformation in Bretagne (France): an experiment involving differential GPS, gravimetry and tide gauges, *Boll. Geofisica Geodetica* 40 (2–3) (1999) 533–536.
- [14] A. Lambert, N. Courtier, G. Sasagawa, F. Klopping, F. Winstner, T. James, J. Liard, New constraints on Laurentide postglacial rebound from absolute gravity measurements, *Geophys. Res. Lett.* 28 (10) (2001) 2109–2112.
- [15] M. Llubes, N. Florsch, M. Amalvict, J. Hinderer, M.-F. Lalancette, D. Orseau, B. Simon, Observation gravimétrique des surcharges océaniques : premières expériences en Bretagne, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 332 (2001) 77–82.
- [16] T. Niebauer, G. Sasagawa, J. Faller, R. Hilt, F. Klopping, A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia* 32 (1995) 159–180.
- [17] S. Okubo, S. Yoshida, T. Sato, Y. Tamura, Y. Imanishi, Verifying the precision of a new generation absolute gravimeter FG5. Comparison with superconducting gravimeters and detection of ocean loading tide, *Geophys. Res. Lett.* 24 (1997) 489–492.
- [18] W.R. Peltier, VLBI baseline variations from the ICE-4G model of postglacial rebound, *Geophys. Res. Lett.* 22 (4) (1995) 465–468.
- [19] T. Sato, Communication personnelle, 2002.
- [20] T. Sato, K. Asari, Y. Tamura, H.-P. Plag, H. Digre, Y. Fukuda, J. Hinderer, K. Kaminuma, Y. Hamano, Continuous gravity observation at Ny-Alesund, Svalbard, Norway with a superconducting gravimeter CT#039, *J. Geod. Soc. Jpn* 47 (1) (2001) 341–346.
- [21] L. Soudarin, J.-F. Crétaux, A. Cazenave, Vertical crustal motions from the DORIS space-geodesy system, *Geophys. Res. Lett.* 26 (9) (1999) 1207–1210.
- [22] T. Van Dam, K. Larson, J. Wahr, S. Gross, O. Francis, Using GPS and gravity to infer ice mass changes in Greenland, *Eos* 81 (37) (2000).
- [23] J.M. Wahr, H. Dazhong, A. Trupin, Prediction of vertical uplift caused by changing polar ice volumes on visco-elastic earth, *Geophys. Res. Lett.* 22 (1995) 977–980.