

Le kilogramme, la constante de Planck et le soulèvement de l'Ardenne

Van Camp, M.¹, Camelbeeck, T.¹ et Richard, P.²

¹Observatoire Royal de Belgique, Séismologie, Avenue Circulaire, 3, B-1180 Bruxelles, Belgique.

mvc@oma.be

²Office Fédéral de Métrologie et d'Accréditation METAS,
Lindenweg 50, CH-3003 Berne-Wabern, Suisse.

philippe.richard@metas.ch

(Article publié dans Ciel et Terre, 120 (1) janvier-février 2004, traduction et adaptation de l'article publié initialement dans Physicalia Magazine, Journal de la Société Belge de Physique, 25 (3), pp 161-174, Sept. 2003)

1. Introduction

Il y a encore une quinzaine d'années, la valeur absolue de la pesanteur g ¹ n'était mesurée qu'en de rares points, par des instruments de laboratoire quasiment intransportables. Les gravimètres relatifs à ressort assuraient la grande majorité des mesures des variations spatiales et temporelles de g . En d'autres termes, g et ses variations en un point étaient déduites de la différence mesurée entre ce point et une station de référence où la valeur absolue de g était déterminée et considérée comme stable. Depuis, les progrès technologiques ont rendu les gravimètres absolus transportables, mais aussi beaucoup plus précis. Aussi, ils seront progressivement amenés à prendre le relais des instruments relatifs.

Mais pourquoi mesurer g ? La pesanteur varie dans le temps et l'espace et dépend entre autres de la latitude, de la répartition des masses à l'intérieur de la Terre, de la rotation de la Terre sur elle-même (vitesse et position de l'axe de rotation), ainsi que des positions relatives de la Lune et du Soleil, qui génèrent les forces de marée². De nos jours, la précision des gravimètres absolus a ouvert de nouvelles voies, depuis l'étude des déformations lentes de la croûte terrestre à la redéfinition du kilogramme. Ainsi, en **géophysique**, on mesure les variations de g pour étudier les déformations tectoniques [1], le rebond postglaciaire [2], les marées, l'influence de l'atmosphère, de la cryosphère et de l'hydrosphère, ainsi que la structure et la dynamique du globe depuis la graine jusqu'à la croûte terrestre. Par ailleurs, l'analyse des variations locales de g a de nombreuses applications en **géologie**. En **géodésie**, g est indispensable pour déterminer le géoïde et partant, les altitudes puisque le géoïde représente le niveau moyen des mers et son prolongement sous les continents. Enfin, en **métrologie**, g intervient dans la détermination d'unités dérivées du kilogramme (ampère, pression, force) et est appelé à jouer un rôle clé dans la nouvelle réalisation du kilogramme [3][4]. La masse est la seule unité de base du Système International (S.I.) de mesures qui repose encore sur un étalon matériel, ce qui pose problème, surtout parce que la stabilité du prototype du kilogramme n'est pas bien connue.

¹ La pesanteur g est la norme de l'accélération de la pesanteur \vec{g}

² L'accélération de marée due aux planètes proches est 10^4 (Vénus) à 10^5 (Mars et Jupiter) fois plus faible que celle induite par la Lune et le Soleil. C'est habituellement négligeable, mais il faut les considérer lorsque l'on traite les données de haute qualité des gravimètres à supraconductivité qui enregistrent les variations de g en continu.

Divers laboratoires à travers le monde recherchent à dématérialiser cet étalon ; l'approche la plus prometteuse est la balance de Watt qui devrait permettre de déterminer le kilogramme en fonction du mètre, de la seconde et de la constante de Planck h , en égalant la puissance mécanique à la puissance électrique mesurée sur base des effets Hall quantique et Josephson.

Nous présentons tout d'abord le gravimètre absolu FG5 de Micro-g Solutions (Colorado, U.S.A.)[6]. Cet instrument, le seul disponible sur le marché, est aussi le plus précis et mesure g avec une exactitude du milliardième. Deuxièmement, nous décrivons l'expérience de la balance de Watt et passons brièvement en revue d'autres approches destinées à la redéfinition de la masse. Ensuite, nous présentons les derniers résultats des campagnes de gravimétrie absolue effectuées en Ardenne afin de mesurer les déformations tectoniques en zone intraplaque. Enfin, nous passons brièvement en revue trois techniques à venir en gravimétrie.

2. Le gravimètre absolu FG5

2.1 Principe de fonctionnement

Le principe du gravimètre absolu FG5 est d'observer la chute libre d'un réflecteur en coin de cube relâché à maintes reprises. Cette masse-test parcourt 20 cm pendant 0.2 seconde dans une chambre sous vide et est entourée d'un boîtier qui l'accompagne dans sa chute pour éviter les effets de traînée des molécules d'air résiduelles. Ce boîtier est mu par un moteur qui assure les remontées, ainsi que le contrôle des chutes. La position de la masse est mesurée par interférométrie laser. Un des bras d'un interféromètre Mach Zender, le faisceau test, est envoyé vers le réflecteur en chute libre, qui le réfléchit vers un autre réflecteur suspendu à un sismomètre longue période (période propre ~ 60 s) qui fournit un référentiel inertiel³ (Figure 1). Ensuite, le faisceau test se recombine à l'autre faisceau, dit de référence. Lorsque la masse tombe, elle provoque des franges d'interférence détectées par une photodiode à avalanche et chronométrées par une horloge atomique au rubidium. C'est un laser Hélium Néon stabilisé à l'iode qui fournit l'étalon de longueur ; les mesures absolues de pesanteur sont donc liées directement aux unités de longueur et de temps du S.I.

³ Le "Superspring", ou « ressort asservi », est en fait un sismomètre longue période qui élimine les vibrations de périodes inférieures à 1 minute. Pour obtenir un tel ressort, sa longueur devrait atteindre environ $l = gT^2/(2\pi)^2 \sim 1$ km. Le ressort asservi imite électroniquement un tel ressort. L'idée est que dans un ressort réel, les spires proches du bas bougent presque avec la même amplitude que la dernière spire. Un capteur détecte la différence entre le sommet et le fond d'un ressort de 20 cm, et le sommet est déplacé pour imiter le mouvement qu'aurait une spire à 20 cm du fond d'un ressort d'un km.

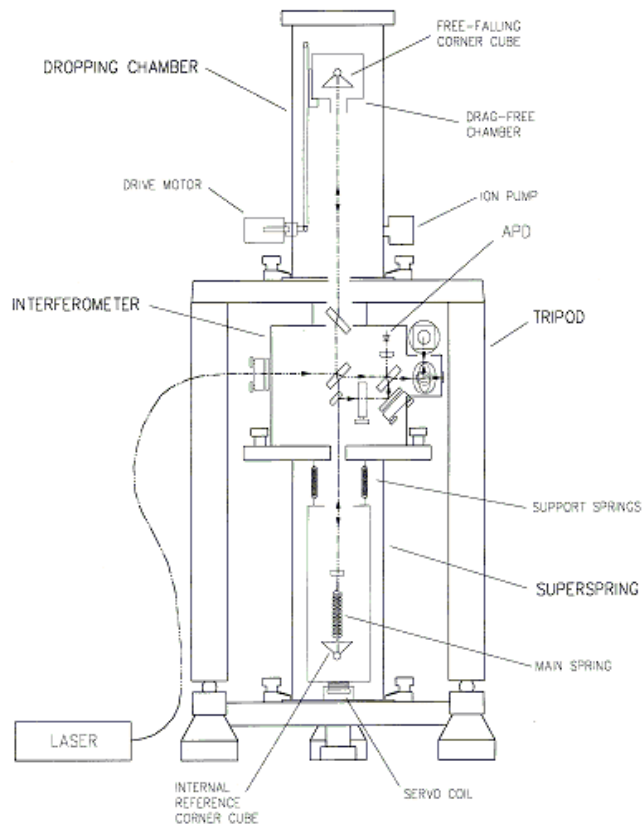


Figure 1. Le gravimètre absolu FG5: un réflecteur en coin de cube (semblable à un catadioptré) est contenu dans une chambre l'accompagnant dans sa chute, contrôlée par un moteur asservi. Ce réflecteur parcourt 20 cm pendant 0.2 seconde dans une chambre à vide ("dropping chamber"). Le "superspring", ou ressort asservi, est un système anti-vibration qui fournit le référentiel inertiel. Pour des photos en couleur, voir p.ex. <http://homepage.oma.be/mvc/absolu.htm>. Figure d'après Micro-g, 1999.

Un total de 700 paires temps-position sont enregistrées le long des 20 cm de la chute. Des lancers peuvent être produits toutes les deux secondes mais en service normal, ils se produisent toutes les 10 secondes, 100 fois par heure. La moyenne des 100 lancers fournit un « set », de déviation standard du 4 à 15 μGal^4 en conditions normales. On enregistre habituellement un set par heure, la moyenne de plusieurs sets (habituellement de 12 à 48) fournit la valeur de la pesanteur avec une exactitude d'un à deux μGal [6]. Cependant, des effets environnementaux, imparfaitement corrigés à l'heure actuelle, affectent la pesanteur dans une large bande de fréquence (de la minute à plusieurs dizaines d'années). Un même instrument montre fréquemment des différences supérieures à 2 μGal à deux intervalles de temps différents, parfois séparés seulement de 24 h (voir par exemple la section 5).

Le logiciel d'acquisition de données ajuste par la méthode des moindres carrés la fonction

⁴ 1 $\mu\text{Gal} = 10 \text{ nm s}^{-2}$ ($g = 981\,046\,725 \pm 5 \mu\text{Gal}$ à Membach)

$$x_i = x_0 + v_0 \tilde{t}_i + \frac{g_0}{2} \left(\tilde{t}_i^2 + \frac{1}{12} \gamma \tilde{t}_i^4 \right)$$

$$\tilde{t} = t_i - \frac{(x_i - x_0)}{c}$$
(1)

aux observations x_i, t_i de la trajectoire. Les trois inconnues x_0, v_0 et g_0 sont les position, vitesse et accélération initiales à $t=0$; γ est le gradient vertical de la pesanteur et c , la vitesse de la lumière. Des méthodes ont été testées pour calculer le gradient de pesanteur en même temps que les paramètres de la chute, mais elles se sont avérées difficiles à mettre en œuvre vu la faiblesse du rapport signal bruit. En pratique, ce gradient se mesure à l'aide d'un gravimètre relatif à ressort et avoisine les 3 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$. Comme la vitesse de la lumière est finie, les interférences se produisent au temps $\Delta t(t) = L(t)/c$ après que le faisceau ait été réfléchi par l'objet en chute libre. Sans cette correction, une erreur d'environ -11 μGal affecterait la pesanteur pour une chute de 20 cm.

La valeur finale de la pesanteur s'obtient après correction des effets des marées terrestres, de la surcharge océanique⁵, de l'atmosphère (-0.3 $\mu\text{Gal}/\text{hPa}$ dû à la charge et à l'attraction newtonienne des masses d'air) et du mouvement du pôle⁶. Actuellement, il y a environ 40 gravimètres absolus en service dans le monde et l'Observatoire royal de Belgique possède



Figure 2. Le gravimètre absolu FG5-202 de l'O.R.B. en mesure à l'Observatoire de Nice (Photo J.-J. Walch)

par exemple 12 cm dans les Cornouailles, mais moins de 2 cm à Membach (est de la Belgique). Les effets de surcharge des marées océaniques s'ajoutent aux déformations des marées terrestres ("marées solides"), qui atteignent 40 cm pic à pic aux latitudes moyennes.

⁶ En l'absence d'excitation, un corps tend à tourner autour de son moment principal d'inertie. En réponse à une excitation, l'axe de rotation peut se déplacer et oscille autour de l'axe principal d'inertie : c'est le mouvement du pôle. Sa composante principale est l'oscillation de Chandler, où le pôle décrit une ellipse de quelques dizaines de mètres d'envergure à une période de 14 mois. Ce mouvement est principalement provoqué par les interactions entre les océans, les atmosphères et la Terre. Comme l'axe de rotation est modifié, il en va de même pour la force centrifuge, ce qui induit des variations de la pesanteur de 10 μGal pic à pic, mesurées par les gravimètres absolus et à supraconductivité.

2.2 Contrôle du FG5

Afin d'assurer le bon fonctionnement du gravimètre, il faut le vérifier régulièrement à une station de référence. On effectue donc des mesures à la station de géophysique de Membach [7] avant et après chaque campagne de mesure sur le terrain. A Membach, le gravimètre à supraconductivité GWR C021 [8] mesure les variations de pesanteur en continu avec une résolution meilleure que $0.1 \mu\text{Gal}$. Cet instrument consiste essentiellement en une sphère qui lévite dans un champ magnétique, où l'on mesure les déplacements proportionnels aux variations de g . Ce gravimètre ne fournit que des mesures relatives de la pesanteur et n'est pas mobile, contrairement au gravimètre absolu. Les observations en une même station des gravimètres absolu et supraconducteur permettent d'éliminer des incertitudes liées à des variations de g qui seraient induites par des effets instrumentaux, vu que les principes techniques de ces gravimètres diffèrent totalement. On peut donc contrôler le FG5 et vérifier si les variations temporelles de g sont réelles ou dues à un problème technique [7].

En tant qu'instrument de référence et de haute précision, le FG5 belge participe à de nombreuses comparaisons internationales [9][10]. Par exemple, au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM, Sèvres, France), au Laboratoire Souterrain de Géodynamique de l'ECGS (Walferdange, Grand duché de Luxembourg), au Bureau fédéral de Cartographie et de Géodésie (Francfort, Allemagne) ou à l'Office Fédéral de Métrologie et d'Accréditation (METAS, Berne, Suisse) qui développe une balance de Watt [4].

3. La redéfinition de la masse : l'expérience de la balance de Watt

Le kilogramme et la seule unité de base du S.I. dont la définition repose encore sur un étalon matériel, et non sur des phénomènes fondamentaux de la nature. Cet étalon est le Prototype International du Kilogramme, aussi appelé « K » (« Grand K », dans toutes les langues), qui consiste en un cylindre de platine iridié conservé au BIPM à Sèvres. Cette définition pose de nombreux problèmes, dont les principaux sont :

1. La stabilité du prototype n'est pas garantie et les variations ne peuvent pas être correctement quantifiées: il n'existe pas de référence « parfaite » pour le tester. Cependant, des comparaisons entre des prototypes sélectionnés d'un kg et K montrent que les variations à long terme du kilogramme pourraient atteindre 5 parties sur 10^9 par an [11][12].
2. Les valeurs des copies nationales ne peuvent pas être vérifiées au plus haut niveau sans être directement comparées à K. Le fait qu'un seul étalon assure la traçabilité de la masse à l'échelle mondiale n'est pas sans poser d'importants problèmes logistiques. Remarquons que la plupart des instituts nationaux de métrologie n'abritent qu'une seule copie officielle du kilogramme (la Belgique détient le N° 37, sur un total d'environ 80).

Afin d'adapter le S.I. aux besoins croissants de la science et de la technologie, il s'avère indispensable de redéfinir le kilogramme sur base de constantes fondamentales. Une nouvelle définition s'imposera lorsque la relation entre la masse et les constantes fondamentales atteindra une incertitude relative de moins d'une partie sur 10^8 (cf. l'article récapitulatif [5]).

Les lignes qui suivent décrivent l'expérience de la balance de Watt qui vise à contrôler le kilogramme en égalant les puissances mécanique et électrique. Comme cette dernière se mesure en terme des effets Hall quantique et Josephson, la masse peut ainsi être directement reliée à la constante de Planck.

L'expérience se déroule en deux temps (Figure 3). Considérons tout d'abord un bobinage suspendu à un bras d'une balance et immergé dans un flux horizontal de champ magnétique Φ .

Le courant I qui circule dans le bobinage exerce une force verticale qui contrebalance le poids F_m de la masse à tester m :

$$F_m = mg = -I \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (2)$$

où g est l'attraction locale de la pesanteur. Dans un second temps (mode dynamique), le bobinage oscille de manière à assurer une vitesse constante v à l'endroit de la pesée, où l'on mesure la tension U induite dans le bobinage:

$$U = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} \cdot v \quad (3)$$

Combinant (2) et (3), on élimine le gradient du flux $\partial \Phi / \partial z$, qui est un facteur géométrique difficile à mesurer, et l'on obtient finalement:

$$U \cdot I = m \cdot g \cdot v \quad (4)$$

Cette expérience permet donc de comparer le Watt réalisé électriquement avec le Watt obtenu mécaniquement. Il faut donc mesurer l'accélération de la pesanteur⁷ g à l'aide d'un gravimètre absolu, et c'est à ce niveau que l'Observatoire royal de Belgique collabore avec METAS en apportant sa longue tradition en terme de mesure de la pesanteur. Trois autres instituts développent actuellement des balances de Watt : le National Physical Laboratory (NPL, Royaume-Uni), le National Institute of Standards and Technology (NIST, Etats-Unis) et METAS ([3][4]). Deux autres projets sont annoncés au Bureau National de Métrologie (BNM, France), ainsi qu'au BIPM. Le BNM mesurera la pesanteur à l'aide d'un gravimètre atomique (cf. Section 6), alors que les autres instituts utilisent leur propre FG5.

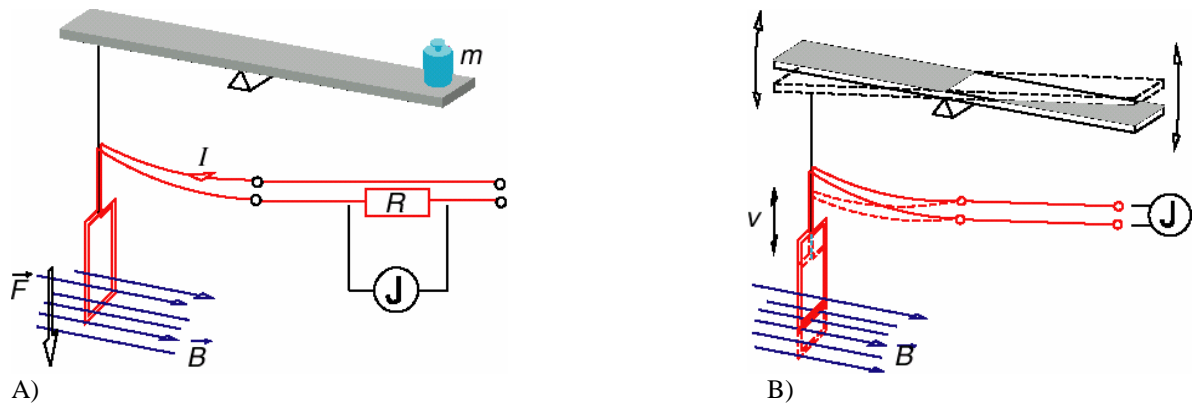


Figure 3. La balance de Watt. A) *Mode statique*: la force électromagnétique qui agit sur le bobinage où circule le courant I contrebalance le poids mg de la masse-test. B) *Mode dynamique*: le bobinage bouge verticalement dans le champ magnétique B , ce qui induit une tension U que l'on mesure.

On obtient: $U I = m g v$ où U et I sont déterminés par les effets Josephson et Hall quantique $\Rightarrow m g v \sim f_j, h$. f_j est la fréquence de Josephson et h , la constante de Planck. Un gravimètre absolu fournit g . Figure d'après METAS, Bern-Wabern.

⁷ L'accélération de la pesanteur dépend des positions des masses terrestres et extraterrestres, ainsi que de la rotation de la Terre. Il ne faut pas la confondre avec l'attraction gravitationnelle, uniquement induite par l'attraction de masses.

3.1 Proposition de définition du kilogramme basée sur la constante de Planck

On mesure la tension U par rapport à un étalon de tension Josephson⁸ et le courant I par la chute de tension aux bornes d'une résistance étalon basée sur l'effet Hall⁹ quantique. Dès lors, (4) devient:

$$m = \frac{1}{g \cdot v} kh \quad (5)$$

où k est une constante et h , la constante de Planck [5]. C'est à l'aide d'une balance de Watt que Williams et al. [13] ont obtenu la meilleure mesure de la constante de Planck en 1998, avec une incertitude de 8.7×10^{-8} et une valeur de $6.62606891 \times 10^{-34}$ J s.

Lorsque la balance de Watt atteindra la précision voulue d'une partie sur 10^8 , il faudra tout d'abord vérifier la stabilité de K . Ensuite, on pourra alors tout naturellement redéfinir le kilogramme de telle sorte que, par exemple, h soit fixée (à l'instar de la définition du mètre où il a fallu fixer c). D'après Taylor et Mohr [14], la nouvelle définition du kilogramme pourrait être "la masse d'un corps au repos dont l'équivalent en énergie égale l'énergie de photons dont la somme des fréquences égale 135639274×10^{42} Hz". Cette définition découle de la fameuse relation d'Einstein $E = mc^2$ et de l'égalité $E = h\nu$ qui s'applique à l'énergie des photons. Dès lors, la balance de Watt serait une réalisation du kilogramme, comme l'est un laser He-Ne stabilisé à l'iode dans le cas du mètre.

3.2 Les autres approches

3.2.1 La balance de tension

On compare la force électrostatique qui agit entre les plaques d'un condensateur avec le poids mg d'une masse-test m . Les techniques disponibles actuellement ne permettent pas d'atteindre une incertitude meilleure qu'une part sur 10^7 . Les problèmes trouvent principalement leur source dans les hautes tensions exigées par l'expérience (10-100 kV), la dépendance en fréquence et en tension de la capacité et ses imperfections mécaniques [5].

3.2.2 La lévitation magnétique supraconductrice

Tout comme pour le projet de la balance de Watt, cette méthode vise à relier le kilogramme aux effets Hall quantique et Josephson. Un corps supraconducteur lévite dans un champ magnétique généré par des bobines supraconductrices, où circule un courant nécessaire à la lévitation qui est proportionnel à la masse en lévitation. Les problèmes principaux à surmonter sont dus aux composantes horizontales des forces de lévitation, aux déformations de l'objet en lévitation, ainsi qu'à la difficulté d'obtenir un objet parfaitement diamagnétique [5].

⁸ Effet Josephson : Si l'on refroidit une fine barrière isolante entre deux supraconducteurs à 4.2 K, et qu'elle est exposée à une radiation électromagnétique à fréquence f , la chute de tension DC V_j aux bornes de la jonction varie par valeurs discrètes $V_j = nf\hbar/2e = nf/K_j$, où K_j est la constante de Josephson, n un entier, \hbar la constante de Planck et e , la charge électronique. Esaki, Giaever et Josephson ont été récompensés du prix Nobel 1973 pour avoir prédit cet effet.

⁹ Effet Hall quantique: la résistance de Hall mesurée dans un semi-conducteur MOSFET à faible température et en présence d'un fort champ magnétique est quantifiée: $R_H = h/ie^2 = R_k/i$ (R_k est la constante de von Klitzing et i un entier). Cet effet fut découvert en 1980 par G. Dorda, M. Pepper et K. von Klitzing, ce qui a valu à ce dernier le prix Nobel en 1985.

3.2.3 Le projet Avogadro

Alors que les approches précédentes visent à définir la masse en égalant puissances électriques et mécaniques, le projet international Avogadro se propose de relier le kilogramme à un nombre fixé d'atomes de silicium [5][15][16]. La masse d'une sphère en silicium est reliée à la constante d'Avogadro par l'équation :

$$m = \frac{M_m}{N_A} \times \frac{V}{v_0} = \text{masse d'un atome de Si} \times \text{nombre d'atomes} \quad (6)$$

où m est la masse de la sphère, M_m la masse molaire des isotopes du silicium mesurée par spectroscopie¹⁰, N_A la constante d'Avogadro, V le volume de la sphère mesuré par interférométrie et v_0 le volume occupé par un atome de silicium mesuré par interférométrie au rayons X. La réalisation pratique de cette définition nécessite un calcul de N_A à partir d'une valeur initiale de la masse de la sphère. Dès que la précision nécessaire sera atteinte, on pourra fixer N_A , ce qui permettra par la suite de contrôler la masse m de la sphère. On pourrait adopter alors la définition suivante¹¹ : « le kilogramme est la masse de $1000/12 N_A$ atomes de ^{12}C ».

Outre le problème de mesurer N_A avec une incertitude relative d'une partie sur 10^8 , une autre difficulté est de contrôler la croissance d'oxydes de silicium à la surface de la sphère.

Les constantes de Planck et d'Avogadro sont reliées entre elles par la masse atomique relative de l'électron, le carré de la constante de structure fine et la constante de Rydberg. A l'heure actuelle, ces constantes ne sont pas parfaitement connues et partant, l'expérience d'Avogadro ne permet pas encore de donner avec exactitude h [14].

3.2.4 L'accumulation ionique

A l'instar de la précédente, cette stratégie vise à relier le kilogramme à la masse d'une particule fondamentale en comptant un grand nombre d'atomes identiques. Ici, on accumule un nombre donné d'atomes Au^{197} [17][18]. Le nombre d'ions collectés est proportionnel au courant requis pour les neutraliser, mesuré à l'aide des effets Hall quantiques et Josephson.

¹⁰ Le "Institute for Reference Materials and Measurement (IRMM)" à Geel, Belgique, est le seul au monde capable de mesurer le rapport isotopique (et donc les masses molaires exprimées par rapport au ^{12}C) du silicium avec une incertitude suffisamment faible.

¹¹ Rappelons que par définition une mole de ^{12}C , soit N_A atomes de ^{12}C , pèse 12 g.

4. Mesure de déformations crustales à l'aide d'un gravimètre absolu FG5

Outre leur utilité en métrologie, les gravimètres absolus ont également de nombreuses applications en géophysique. Par exemple, depuis 7 ans, on mesure à Membach une faible diminution de la pesanteur de $(-0.6 \pm 0.1) \mu\text{Gal}/\text{an}$ (Figure 4), ce qui pourrait indiquer une possible élévation de la station de 3.0 mm/an. Elle semble se confirmer par les (2.7 ± 0.2) mm/an observés par la station GPS (Système de Positionnement Global) à 3 km de la station géophysique de Membach [7]. Si l'on regarde plus attentivement la Figure 3, on voit que les observations du gravimètre à supraconductivité s'accordent à celle du gravimètre absolu au niveau du μGal et montrent également un signal quasi-annuel, très probablement dû en grande partie à des variations hydrologiques locales, en cours d'investigation. La variation de $\sim 5 \mu\text{Gal}$ pic à pic varie significativement d'année en année, en fonction du contexte météorologique. Les précipitations aux alentours de Membach sont uniformément réparties sur l'année mais la

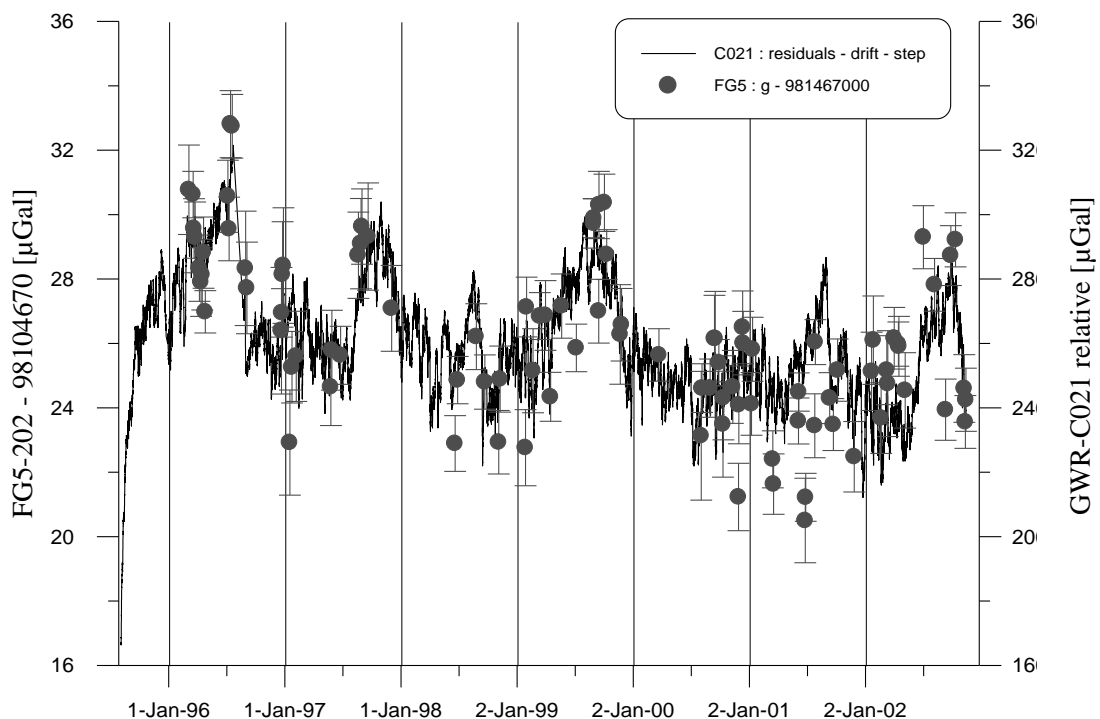


Figure 4. Comparaison entre les mesures de pesanteur du SG-C021 et du AG FG5-202, après correction des effets des marées terrestres et océaniques, de l'atmosphère et du mouvement du pôle. La dérive instrumentale du SG C-021 de $4.3 \mu\text{Gal}/\text{an}$ a été calculée sur base de la différence entre les mesures des deux instruments. Les barres d'erreur du AG représentent 1σ . La décroissance exponentielle d'août à décembre 1995 est due à l'installation du SG C-021. Il reste de mars 1996 à novembre 2002 une tendance principalement linéaire d'origine géophysique de $-0.6 \pm 0.1 \mu\text{Gal}/\text{an}$.

pesanteur diminue en hiver vu la réduction de l'évapotranspiration. Cette relation inverse peut

surprendre car habituellement, une augmentation des masses d'eau dans le sol provoque une augmentation de la pesanteur. Cependant, le laboratoire de Membach se trouve à l'extrémité d'une galerie longue de 140 m excavée dans une colline, à 49 m de la surface. Ceci signifie que les masses hydriques se trouvent au-dessus du gravimètre et vu la profondeur, l'eau s'évapore avant d'avoir pu percoler sous l'instrument.

Afin de confirmer le soulèvement de l'Ardenne, confirmé à l'échelle géologique par l'enfoncement des rivières, et d'estimer sa longueur d'onde, nous effectuons depuis 1999 un profil semestriel de mesures absolues de g en 8 stations à travers l'Ardenne et le Graben de la Roer. Les déformations actuelles pourraient être liées aux failles actives en Ardenne et/ou bordières du graben de la Roer (c'est un paramètre important pour déterminer l'aléa sismique, non négligeable dans nos régions (Ciel & Terre 115, 1999)); au panache volcanique de l'Eifel ou au rebond post-glaciaire finno-scandinave [1]. A l'une des stations du profil, Jülich, nous observons une variation de pesanteur de $2.6 \pm 1.4 \mu\text{Gal}/\text{an}$ causée par la subsidence de plus d'un centimètre par an causée par les pompages de la nappe phréatique effectués par les sociétés minières depuis plus de cinquante ans [19]. Cela réduit à néant tout espoir d'y observer des déformations tectoniques, mais cette station aux taux de déformations bien étudiés constitue un test; par ailleurs, ces mesures de pesanteur fournissent des informations précieuses en hydrologie, par exemple sur les redistributions des masses suite à la compaction du sol. Soit dit en passant, Jülich illustre les difficultés d'effectuer des mesures de déformations tectoniques lentes dans des régions à forte densité de population, et en particulier dans le graben de la Roer où les déformations causées par les activités minières sont nombreuses. Aux autres stations, on n'observe jusqu'à présent aucune variation de la pesanteur supérieure à ce qui est physiquement détectable dans le bruit des mesures, à savoir $1.8 \mu\text{Gal}/\text{an}$ (2σ), ce qui est équivalent à une déformation de 9 mm/an. Cette expérience de longue haleine devrait se poursuivre au moins jusqu'en 2009, où nous devrions pouvoir connaître les variations lentes de g avec une précision meilleure que $0.5 \mu\text{Gal}/\text{an}$.

Nous mesurons également g une fois par an à Ostende, afin de déterminer les mouvements du sol au voisinage du marégraphe. A ce titre, le FG5-202 participe à "l'European Sea Level Service (ESEAS)", organisation qui centralise les mesures du niveau moyen des mers en Europe pour l'étude des effets du réchauffement global de la Terre.

5. Le futur

Emballé dans ses caisses, le FG5 pèse plus de 350 kg, son transport nécessite donc deux personnes, ainsi qu'un véhicule monovolume. Des chercheurs de Boulder (Colorado) travaillent activement à un modèle plus compact où le mouvement de la masse test est contrôlé par une came en rotation autour d'un axe horizontal [20]. La chute libre se produit sur une distance de 2 cm, 200 fois par minute, contre respectivement 20 cm et maximum 30 fois dans le cas du FG5.

Bien qu'il remplisse encore actuellement un laboratoire entier, le gravimètre absolu du futur pourrait consister en un interféromètre atomique basé sur une fontaine d'atomes froids, où l'on exploite la dualité matière-onde des atomes. Ceux-ci sont à la fois utilisés comme masse-test, mais leurs propriétés ondulatoires permettent d'effectuer des mesures interférométriques de l'effet de g sur les atomes. En comparant un gravimètre atomique avec un modèle FG5, Peters et al. [21] ont obtenu la meilleure confirmation de l'équivalence entre des objets quantique et macroscopique. En d'autres termes, et jusqu'à nouvel ordre, un atome et nous-même subissons la pesanteur de la même manière.

La dernière approche nous vient de l'espace avec des missions tels que GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment [22][<http://www.csr.utexas.edu/grace/>]), qui consiste en des satellites jumeaux lancés en mars 2002. Ils cartographient le champ de pesanteur de la Terre en mesurant la distance séparant les deux orbiteurs. La précision attendue est du millième de celle des FG5, mais ces mesures de pesanteur seront répétées sur la Terre entière tous les 30 jours.

6. Conclusions

Les gravimètres absolus balistiques FG5 sont basés sur des étalons métrologiques de pointe qui leur permettent d'approcher une précision du milliardième de g ($1 \mu\text{Gal}$). Ceci permet maintes applications en géophysique, géodésie, géologie et métrologie, en particulier dans le cadre de la balance de Watt qui vise à redéfinir le kilogramme et où mesurer g au niveau de quelques milliardièmes constitue un facteur clé.

Le premier FG5 a été mis en service il y a plus de 10 ans et à l'heure actuelle, certains effets instrumentaux restent encore prépondérants. Cependant, une intense collaboration entre le constructeur du FG5, les utilisateurs et les laboratoires développant d'autres gravimètres balistiques et atomiques devrait permettre d'atteindre réellement le microgal, ainsi que de miniaturiser l'instrument. Par ailleurs, on peut encore s'attendre à des progrès dans la modélisation des effets environnementaux parasites (aquifères, atmosphère, marées...). L'Observatoire royal de Belgique et METAS s'activent à relever ces défis.

7. Remerciements

Les auteurs remercient très sincèrement Marc Hendrickx (ORB) et Philip Taylor (Institute for Reference Materials and Measurements) pour leur aide lors de la rédaction de cet article.

8. Bibliographie

- [1] M. Van Camp, T. Camelbeeck and O. Francis, Crustal Motions Across the Ardenne and the Roer Graben (North-western Europe) using absolute gravity measurements, *Metrologia*, **39**, 503-508, 2002.
- [2] A. Lambert, N. Courtier, G.S. Sasagawa, F. Klopping, D. Winester, T.S. James, and J.O. Liard, New constraints on Laurentide postglacial rebound from absolute gravity measurements, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2109-2112, 2001.
- [3] W. Beer, B. Jeanneret, B. Jeckelmann, P. Richard, A. Courteville Y Salvadé and R. Dänliker, A proposal for a new moving-coil experiment, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **48** (2), 192-195, 1999.
- [4] W. Beer, A. Eichenberger, B. Jeanneret, B. Jeckelmann, A. Pourzand, P. Richard and J. Schwarz, Status of the METAS Watt balance experiment, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **52** (2), 626-630, 2003.
- [5] A. Eichenberger, B. Jeckelmann, and P. Richard, Tracing Planck's constant to the kilogram by electromechanical methods, *Metrologia*, **40**, 356-365, 2003.
- [6] T. Niebauer, G. Sasagawa, G. Faller, R. Hilt and F. Klopping, A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, **32**, 159-180, 1995.
- [7] O. Francis, M. Van Camp, T. van Dam, R. Warnant and M. Hendrickx, Indication of the uplift of the Ardenne in long term gravity variations in Membach (Belgium), *submitted to Geophys. J. Int.*, 2003.

- [8] R. Warburton and E. Brinton, Recent Developments in GWR Instruments' Superconducting Gravimeters, *Proc. 2nd Workshop on non tidal gravity changes, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, **11**, 23-56, 1995.
- [9] Vitushkin, L., Becker, M., Jiang, Z., Francis, O., van Dam, T.M., Faller, J., Chartier, J.-M., Amalvict, M., Bonvalot, S., Debeglia, S., Desogus, S., Diamant, M., Dupont, F., Falk, R., Gabalda, G., Gagnon, C.G.L., Gattacceca, T., Germak, A., Hinderer, J., Jamet, O., Jeffries, G., Käter, R., Kopaev, A., Liard, J., Lindau, A., Longuevergne, L., Luck, B., Maderal, N., Mäkinen, J., Meurers, B., Mizushima, S., Mrlina, J., Newell, D., Origlia, C., Pujol, E.R., Reinhold, A., Richard, Ph., Robinson, I., Ruess, D., Thies, S., Van Camp, M., Van Ruymbeke, M., de Villalta Compagni, M.F., Williams, S., Results of the Sixth International Comparison of Absolute Gravimeters ICAG-2001, *Metrologia*, **39**, 407-424, 2002.
- [10] M. Van Camp, P. Richard, J. Hinderer, M. Amalvict, R. Falk, B. Luck, M. Hendrickx, and S. Thies, Intercomparisons of the FG5-101, 202, 206 and 209 absolute gravimeters at four different sites, *Proceedings of the Instrumentation and Metrology in Gravimetry (IMG 2002) Workshop, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, Luxembourg, **22** (in press), 2003.
- [11] T. J. Quinn, The kilogram: the present state of our knowledge, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **40**, 2, 81-85, 1991.
- [12] G. Girard, The third periodic variation of national prototypes of the kilogram (1988-1992), *Metrologia*, **31**, 317-336, 1994.
- [13] E. R. Williams, R. L. Steiner, D. B. Newell and P. T. Olsen, Accurate measurement of the Planck constant, *Phys. Rev. Lett.*, **81**, no12, pp 2404-2407, 1998.
- [14] B. N. Taylor and P. J. Mohr, On the redefinition of the kilogram, *Metrologia*, **36**, 63-64, 1999.
- [15] S. Downes, NPL: Avogadro Project, <http://www.npl.co.uk/mass/avogadro.html>, 2003.
- [16] P. Becker, Tracing the definition of the kilogram to the Avogadro constant using a silicon single crystal, *Metrologia*, **40**, 366-375, 2003.
- [17] D. Ratshko, D. Knolle, E. Finkre and M. Gläser, Accumulation of decelerated gold ions, *Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. B.*, **190**, 217-221, 2002.
- [18] M. Gläser, Tracing the atomic mass unit to the kilogram by ion accumulation, *Metrologia*, **40** 376-386, 2003.
- [19] M. Van Camp, Man-induced subsidence in Jülich observed by the FG5#202 absolute gravimeter in a noisy environment, *accepted by the Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxemburg*, **22**, 2003.
- [20] A. L. Vitoushkine and J. E. Faller, Measurement results with a small cam-driven absolute gravimeter, *Metrologia*, **39**, 465-469, 2002.
- [21] A. Peters, K. Yeow Chung and S. Chu, Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms, *Nature*, **400**, 849-852, 1999.
- [22] B. D. Tapley, Th. Gruber, M. Watkins, GRACE Science data system design, *Suppl. To EOS Trans. AGU*, **80** (46), 1999.