

La station de mesure de la marée gravimétrique du B.I.P.M.
Installation et résultats préliminaires

Exposé présenté par A. Sakuma le 29 janvier 1974
(Notes prises et rédigées par P. Carré)

I. Introduction

Marée gravimétrique : ensemble des variations subies par l'accélération due à la pesanteur, au cours du temps, en un lieu donné.

La station de mesure de la marée gravimétrique installée au sous-sol de la salle 6 est la première station d'Ile-de-France et la première station qui soit installée dans un laboratoire de métrologie. Il y a, dans le monde, une dizaine de telles stations dans des laboratoires de géophysique (Strasbourg par exemple).

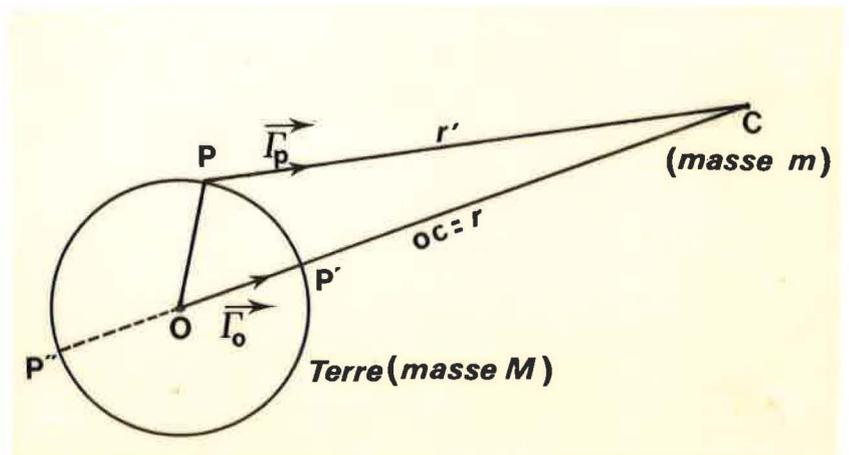
Raisons de cette installation au B.I.P.M.

- détermination expérimentale des corrections à appliquer aux mesures absolues de g .
- la marée déterminée théoriquement semble s'écarter significativement de la marée réelle.
- la précision recherchée ($10^{-7} g$ ou mieux) exige la compétence de métrologistes qualifiés et des précautions extrêmes en ce qui concerne les vibrations et la stabilisation de température.

Origine de la marée gravimétrique

Comme la marée océanique et la marée terrestre (déplacement du niveau océanique ou terrestre), la marée gravimétrique est due principalement au champ de gravitation des corps célestes suffisamment massifs et proches de la Terre.

Le corps céleste C produit en P une perturbation égale à la différence des champs de gravitation qu'il crée d'une part au centre de la Terre O. C'est, en désignant par G la constante de gravitation (environ $6,67 \times 10^{-11}$ unité SI) :



$$|\vec{r}_p - \vec{r}_o| \approx \frac{Gm}{r'^2} - \frac{Gm}{r^2} \approx \frac{2Gm \cdot r - r'}{r^3}$$

La perturbation maximale Δg est obtenue pour les points P' et P'' tels que $r - r' = \pm a$. (Pour ces deux points, elle correspond d'ailleurs à une diminution de g). Elle a pour valeur :

$$|\Delta g| \approx 2Gm \frac{a}{r^3}$$

En remarquant que $g = \frac{GM}{a^2}$, on peut l'écrire sous la forme :

$$\frac{|\Delta g|}{g} \approx 2 \cdot \frac{m}{M} \cdot \left(\frac{a}{r}\right)^3$$

Le tableau suivant donne pour la lune, le soleil, Vénus et Jupiter les valeurs de

$$\frac{m}{M}, \frac{r}{a}, \frac{|\vec{r}_o|}{g} = \frac{m}{M} \cdot \left(\frac{a}{r}\right)^2 \text{ et } \frac{|\Delta g|}{g}.$$

	Lune	Soleil	Vénus	Jupiter
$\frac{m}{M}$	0,0123	333400	0,817	318,4
$\frac{r}{a}$	60,3	23500	≥ 6500	≥ 98900
$\frac{ \vec{r}_o }{g}$	$3,4 \times 10^{-6}$	604×10^{-6}	$\ll 19 \times 10^{-9}$	$\ll 33 \times 10^{-9}$
$\frac{ \Delta g }{g}$	112×10^{-9}	51×10^{-9}	$\ll 6 \times 10^{-12}$	$\ll 0,7 \times 10^{-12}$

On constate que la perturbation due au soleil est moitié de celle due à la lune, bien qu'il crée au centre de la Terre un champ de gravitation 180 fois plus intense, et que les perturbations dues à la planète la plus proche (Vénus) et à la plus massive (Jupiter) sont négligeables.

La perturbation maximale peut donc atteindre en valeur relative $1,6 \times 10^{-7}$ soit $1,6 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-2}$ (160 μGal).

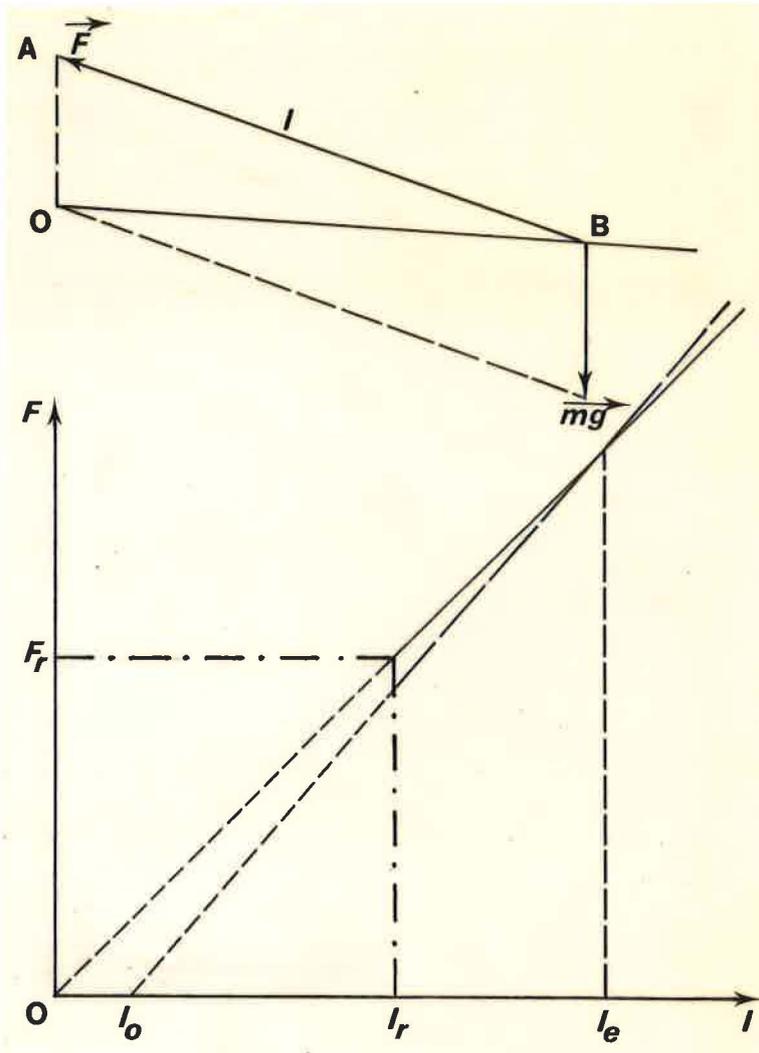
II. Principe de la mesure

Cette perturbation correspond, pour un ressort initialement allongé de 1 m, à une variation de cet allongement de 0,16 μm . Il faut naturellement minimiser l'influence sur l'allongement du ressort de la variation de son coefficient d'élasticité en fonction de la température, donc prendre un ressort en élinvar (coefficient de thermoélasticité $7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Pour que cette influence soit inférieure à 1 % de la grandeur à mesurer il faut stabiliser la température à mieux que

$$\frac{0,16 \times 10^{-6} \times 10^{-2}}{7 \times 10^{-6}} \approx 2 \times 10^{-4} \text{ K}.$$

On utilise en fait le montage ci-contre : un corps de masse m , dont on supposera le centre de gravité en B est mobile autour de l'axe O et maintenu en équilibre par un ressort AB.

On voit immédiatement que si l'on représente le poids du corps mobile par un vecteur \vec{mg} de module égal à la distance fixe AO, l'équilibre est indifférent si la force de traction \vec{F} du ressort est représentée, avec la même échelle, par le vecteur BA, quelle que soit la position du point B : en effet la résultante de \vec{F} et de \vec{mg} est alors représentée par \vec{BO} et est équilibrée par la réaction en O. Un tel ressort a une caractéristique $F = k l$ qui passe par l'origine, on dit qu'il s'agit d'un "ressort de longueur nulle". Naturellement, la partie correspondant à $l < l_r$ n'est pas utilisable ; l_r est la longueur du ressort lorsque ses spires sont jointives et il faut appliquer une force importante, au moins égale à F_r , pour les décoller.



Un ressort de caractéristique $F = k'.(l - l_0)$, avec $l_0 > 0$, donne une position d'équilibre stable pour $l = l_e$; ce qui correspond par exemple à OB horizontal. La sensibilité du système, c'est-à-dire le quotient du déplacement, pratiquement vertical, du point B par la variation de g qui le provoque, est proportionnelle à $\frac{1}{l_0}$. Elle peut être très grande, avec l_0 suffisamment petit. Elle est également proportionnelle au carré de la période des petites oscillations du système. Cette période peut atteindre 20 secondes. Pour qu'un ressort simple vertical chargé ait la même sensibilité, il devrait avoir la même période et son allongement sous charge devrait être environ 100 m : cela est irréalisable.

En ce qui concerne la stabilité de la température à obtenir, le calcul fait plus haut reste valable.

De plus, afin d'éliminer les effets dus à l'hystérésis du ressort, il est intéressant d'employer une méthode de zéro.

.../

III. Réalisation

a) Le gravimètre.

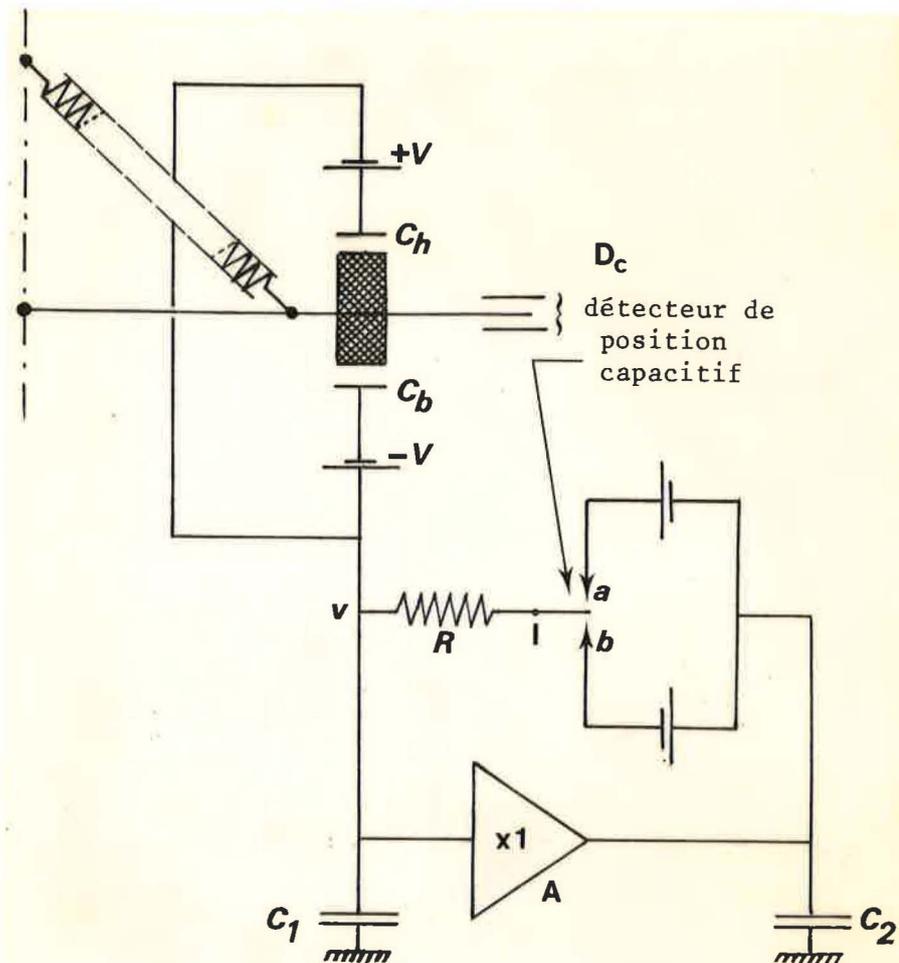
Le gravimètre utilisé est décrit en détail dans le Rapport du Directeur (Procès-Verbaux du C.I.P.M., octobre 1973). Le schéma ci-contre précise le montage électrique, notamment le circuit permettant l'élimination du bruit d'agitation du sol à courte période.

Le détecteur de position capacitif D_c provoque le fonctionnement de l'interrupteur I qui prend la position a ou b selon le signe de la tension de déséquilibre. Grâce à l'amplificateur A , à haute impédance d'entrée et de gain unité, les tensions aux bornes de C_1 et C_2 sont constamment égales. Le courant dans R est donc indépendant de cette tension v . Les condensateurs C_h et C_b , polarisés par les tensions $\pm V$, sont ainsi chargés sous les tensions $V + v$ et $-V + v$ et soumettent la masse m à une force proportionnelle à $(V + v)^2$ vers le haut et à $(-V + v)^2$ vers le bas, donc au total à $4Vv$.

La tension v s'ajuste de façon que le courant dans R soit nul en moyenne, donc que I soit pendant des durées égales en a et en b, c'est-à-dire que le détecteur capacitif soit en moyenne à l'équilibre. La tension v fournit une mesure de la force exercée sur la masse m pour compenser le déséquilibre dû à une variation de g , elle fournit donc une mesure de cette variation. Le montage symétrique donne à l'asservissement une bonne linéarité dans une plage importante : on peut espérer 0,1 % pour $\pm 1,6 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-2}$ (160 μGal) (alors que le montage dissymétrique de Strasbourg ne permet que 1 % et introduit une force parasite proportionnelle à v^2).

On a choisi $V = 30$ volts ; la force nécessaire pour compenser les plus fortes marées gravimétriques est 0,1 μN . Le gravimètre réalisé peut suivre à $8 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-2}$ (0,8 μGal) près une variation de g de $5 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-2}/\text{min}$ (500 $\mu\text{Gal}/\text{min}$).

La précision obtenue est actuellement 10^{-9} g (10^{-8} ms^{-2} ou 1 μGal).



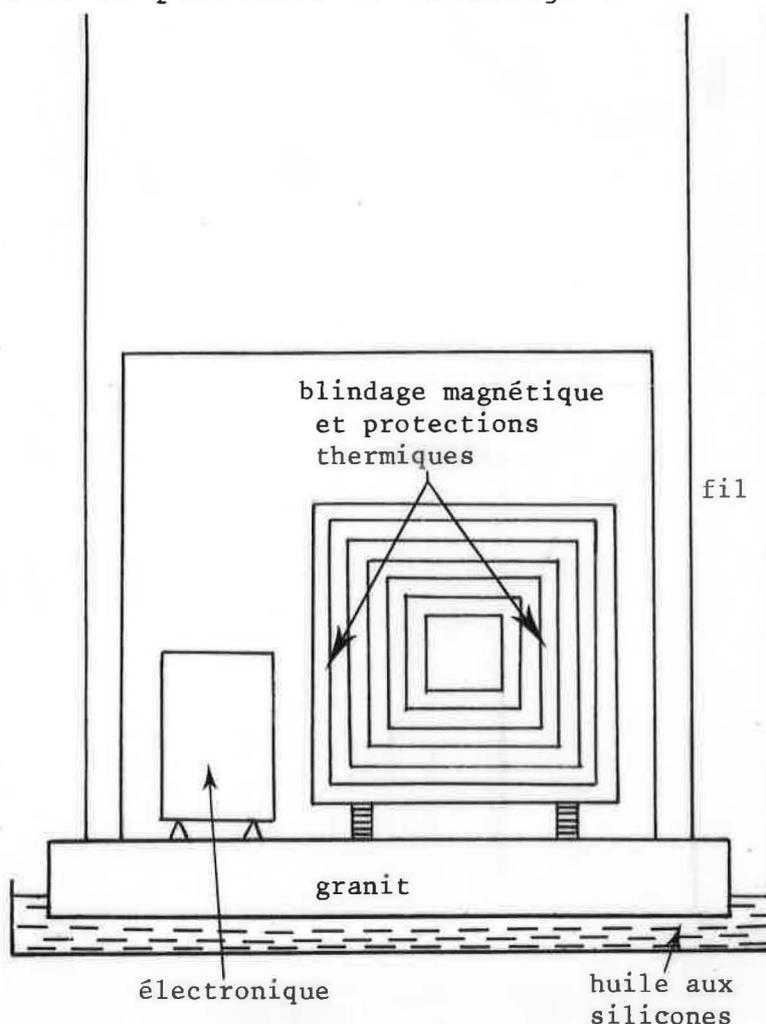
b) Protections.

Le ressort en élinvar étant ferromagnétique, il est nécessaire de protéger le gravimètre contre les variations du champ magnétique terrestre (qui atteignent 1 % et sont dues notamment à la circulation des trains électriques). Un blindage magnétique réduit à moins de 10^{-9} g l'erreur qui leur est due.

Grâce à un blindage thermique (au total sept parois), un détecteur à thermistances et un circuit de chauffage bifilaire (ne produisant pratiquement aucun champ magnétique) la température est stabilisée à 30 μ K près. La constante de temps thermique de l'ensemble est 100 h, de sorte que le fonctionnement par tout ou rien du système de régulation, avec une période de 2 s, ne produit que des fluctuations imperceptibles.

Grâce à l'installation du gravimètre au fond d'un puits de 2 m de profondeur, dans lequel la température est naturellement stable à 10^{-3} K, on a pu réduire la puissance de chauffage à 50 mW pour maintenir une température supérieure de 0,1 K environ à la température naturelle. La stabilité journalière semble être de quelques microkelvins. L'effet saisonnier ne devrait pas être considérable. Pour éviter la transmission de chaleur par les fils de connexion, l'électronique a été installée également au fond du puits dans un caisson à pression constante rempli d'azote.

Cette protection de l'électronique était aussi indispensable pour éviter des dérives de capacité provoquées par des variations de pression atmosphérique, de température et d'humidité, car le détecteur capacitif D_C doit être sensible à une variation de 0,1 fF malgré l'existence des capacités parasites en parallèle de l'ordre de 30 pF, dues principalement aux câbles coaxiaux de liaison électrique.



La protection contre les vibrations est réalisée au moyen d'une suspension par fils de 2 m de longueur qui soutiennent une dalle de granit sur laquelle reposent, par l'intermédiaire de cales piézoélectriques, les diverses enceintes du gravimètre. Les oscillations transversales sont amorties par de l'huile aux silicones.

L'influence des variations de la poussée d'Archimède sur

le gravimètre, dues à d'éventuelles variations de la masse volumique de l'air atmosphérique, a été éliminée en rendant le puits aussi étanche que possible (au moyen d'une peinture spéciale) et en y maintenant une pression constante d'environ 103300 Pa (777 mmHg). Ainsi, on évite l'introduction d'humidité, etc.

On observe actuellement une dérive plus faible que prévu : elle n'est que 3×10^{-9} g par jour (ou 100 μ Gal par mois, alors que les gravimètres commerciaux donnent 300 μ Gal/mois). L'inclinaison due à l'allongement inégal des fils de suspension est actuellement de 1 μ rad/jour. Elle doit être compensée.

IV. Résultats

Les variations de pression atmosphérique agissent sur g à la fois directement par variation de la masse d'air au-dessus de la station et indirectement par affaissement variable du sol. Ces deux effets, de signes contraires, semblent se compenser presque exactement.

Le déphasage de 5 à 15 minutes (en avance) entre les ondes de marée gravimétrique observées et théoriques, déjà décelé au moyen des mesures absolues de g et au moyen du sismomètre associé à l'appareil de mesure absolue, a été confirmé.

Il est prévu d'effectuer un traitement numérique (décomposition en série de Fourier) des mesures effectuées de façon continue par le gravimètre relatif.

Les avantages de la combinaison gravimètre relatif et gravimètre absolu sont réciproques : l'appareil absolu permet d'évaluer les dérives de l'autre et de l'étalonner, l'appareil relatif fournit de façon continue à l'appareil absolu les corrections réelles de marée gravimétrique. Ainsi, la tendance à une variation séculaire de g pourra sans doute être confirmée.
