

La gravitation universelle

G. Paturel, CLEA

NEWTON (1642-1727)

- En 1697, Isaac Newton imagine qu'une force de gravitation F , s'exerce entre deux masses (m et M) séparées par une distance d . Il retrouve les lois de Kepler et montre que cette force est universelle.

$$F = G \frac{m.M}{d^2}$$

- Mais Newton ne connaît pas la constante G !

Les premières tentatives de mesure

- L'astronome et géophysicien Pierre Bouguer tente une mesure en 1730, dans les Andes.



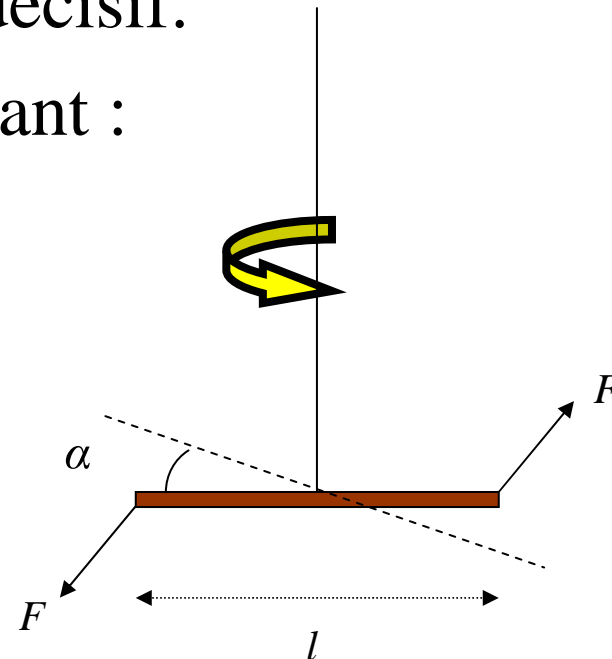
- La mesure sera réussie en 1755 par N. Maskelyne et Ch. Hutton en Ecosse. La densité moyenne de la Terre semble être de l'ordre de 4500 kg/m^3 !

La balance de Coulomb

- En 1790, la balance de torsion, inventée par Ch. Coulomb, apporte un progrès décisif.
- Le principe "génial" est le suivant :

$$F \cdot l = C \cdot \alpha$$

La constante de Coulomb C , est déterminée par la mesure de la période d'oscillation du fléau.



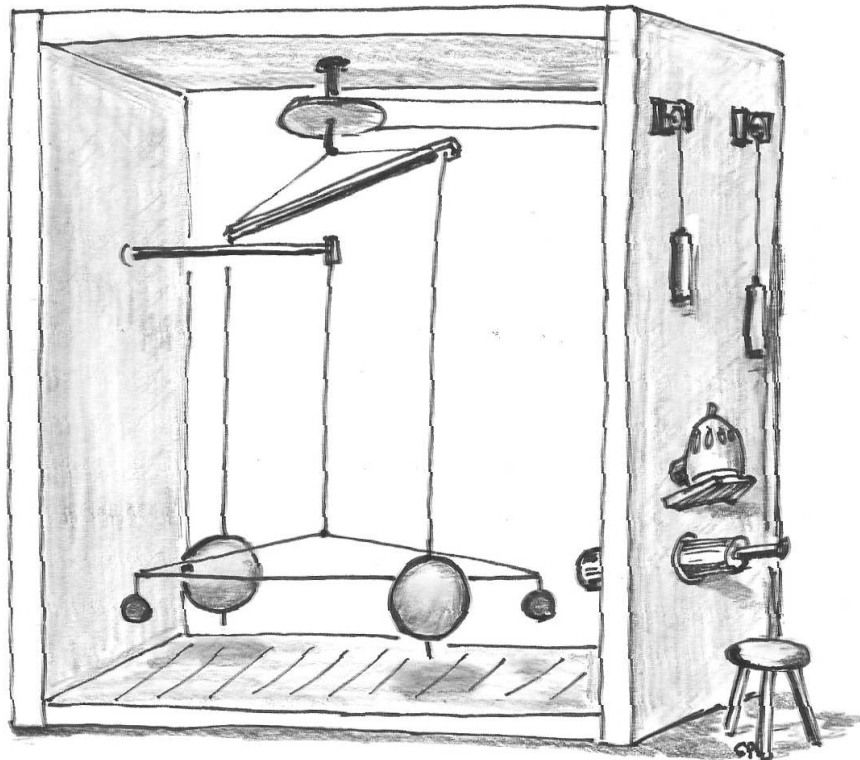
J. Michell et H. Cavendish

- J. Michell imagina d'utiliser une balance de Coulomb pour mesurer la masse de la Terre. Cavendish y parvint en 1798 avec une réalisation monumentale.

Henri Cavendish (1731-1810):
un savant organisé et méticuleux,
taciturne et généreux.



La balance de H. Cavendish



$m=0,75$ kg (plomb)

$M=158$ kg (plomb)

$l=2$ m

$P=15$ minutes

fil : argent de $34 \mu\text{m}$

$\rho_{\text{Terre}} : 5480 \text{ kg/m}^3$ (*)

(*) valeur actuelle : 5527

Sir Ch. V. Boys

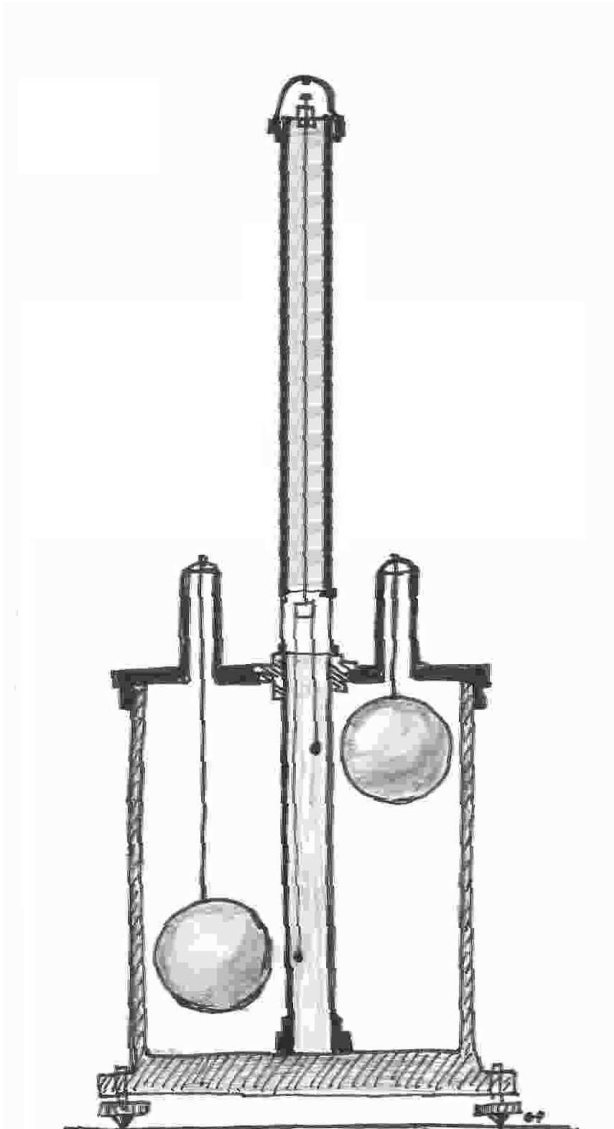
- En 1895, il refait l'expérience de Cavendish Son but est explicitement de mesurer G .

«Etant donné le caractère universel qui s'attache à la constante G , il me semble que c'est descendre du sublime au ridicule que d'annoncer les expériences dont je vais parler comme étant destinées à mesurer la masse de la Terre ou encore, avec moins de précision, le poids de la Terre.»

- Il a une idée géniale : faire une balance minuscule pour gagner en sensibilité (*).

(*) Ceci est vient du fait que la constante de Coulomb varie comme la puissance 4 du diamètre du fil. Une réduction d'échelle augmente la sensibilité en puissance 4 alors que la masse suspendue est réduite seulement comme la puissance 2.

La balance de Boys



$$m=2,7 \text{ g (or)}$$

$$M=7,5 \text{ kg (plomb)}$$

$$l=2,3 \text{ cm}$$

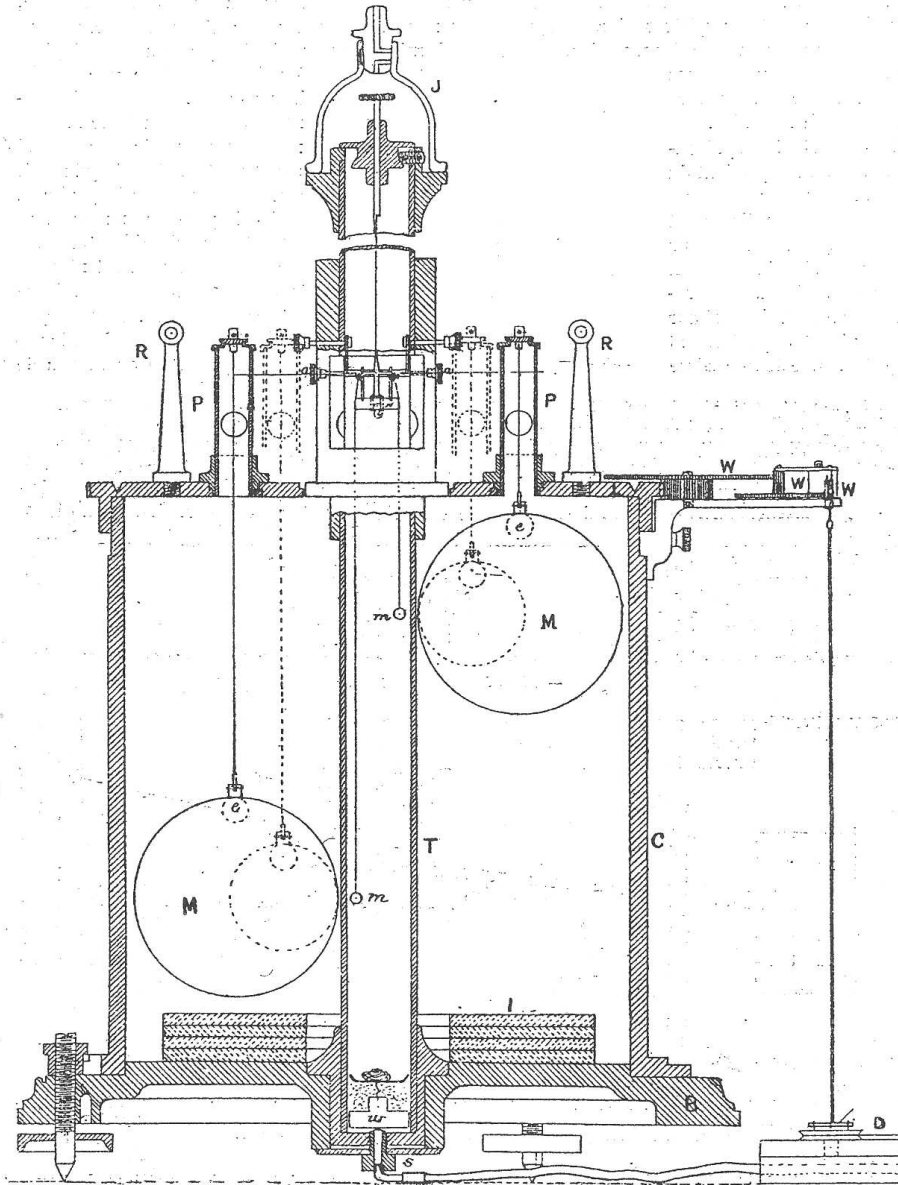
$$P=3 \text{ minutes}$$

$$\text{fil} : 2 \mu\text{m (quartz)}$$

$$G : (6,663 \pm 0,007) \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2} (*)$$

(*) valeur actuelle : $(6,6741 \pm 0,0002) \times 10^{-11} \text{ SI}$

Image détaillée de la balance de Ch. V. Boys



Observatoire, 1 avril 2014

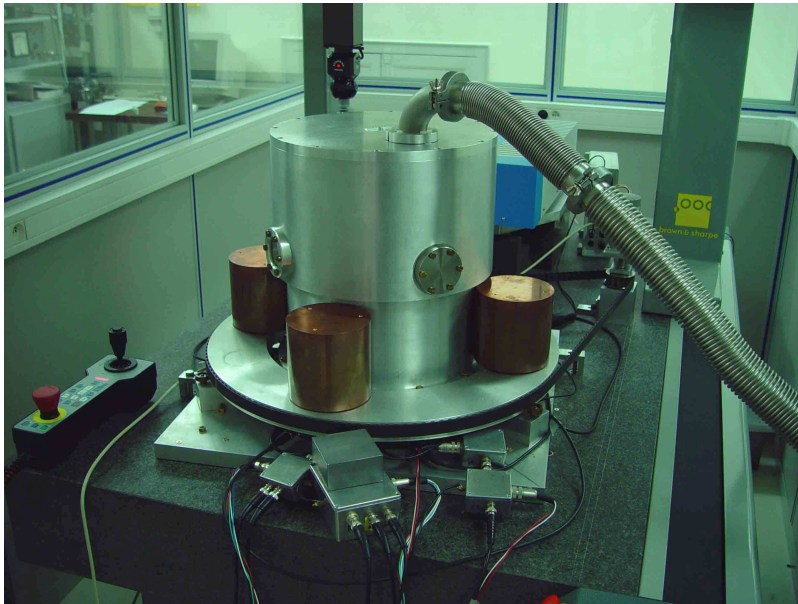
Quelques détails de l'expérience

- **Sir Charles Vernon Boys** (1855-1944) était un spécialiste dans la fabrication des fils de quartz. Il utilisait une technique originale : il accrochait du quartz fondue à la pointe d'une flèche qu'il tirait avec une arbalète. Le fil s'étirait jusqu'à atteindre en se refroidissant un très faible diamètre (de l'ordre de quelques microns).
- Boys effectua ses manipulations dans un souterrain, la nuit, pour éviter les vibrations. Il réalisa les meilleures mesures pendant la grève des charbonnages, durant laquelle les trains étaient arrêtés.
- Lors d'une mesure, il observa une grande variation sans pouvoir l'expliquer. Il apprendra plus tard que cela était dû à un tremblement de terre dont l'épicentre était situé en Roumanie.
- Boys donna une valeur de la constante de gravitation universelle :
 $G = (6,663 \pm 0,007) \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$.

Les développements ultérieurs

1. balance oscillante de Heyl (1942)
2. balance tournante de J. Gundlach et Merkwitz (2000)
3. La balance du BIPM en cours de fonctionnement aujourd'hui.

La balance du BIPM



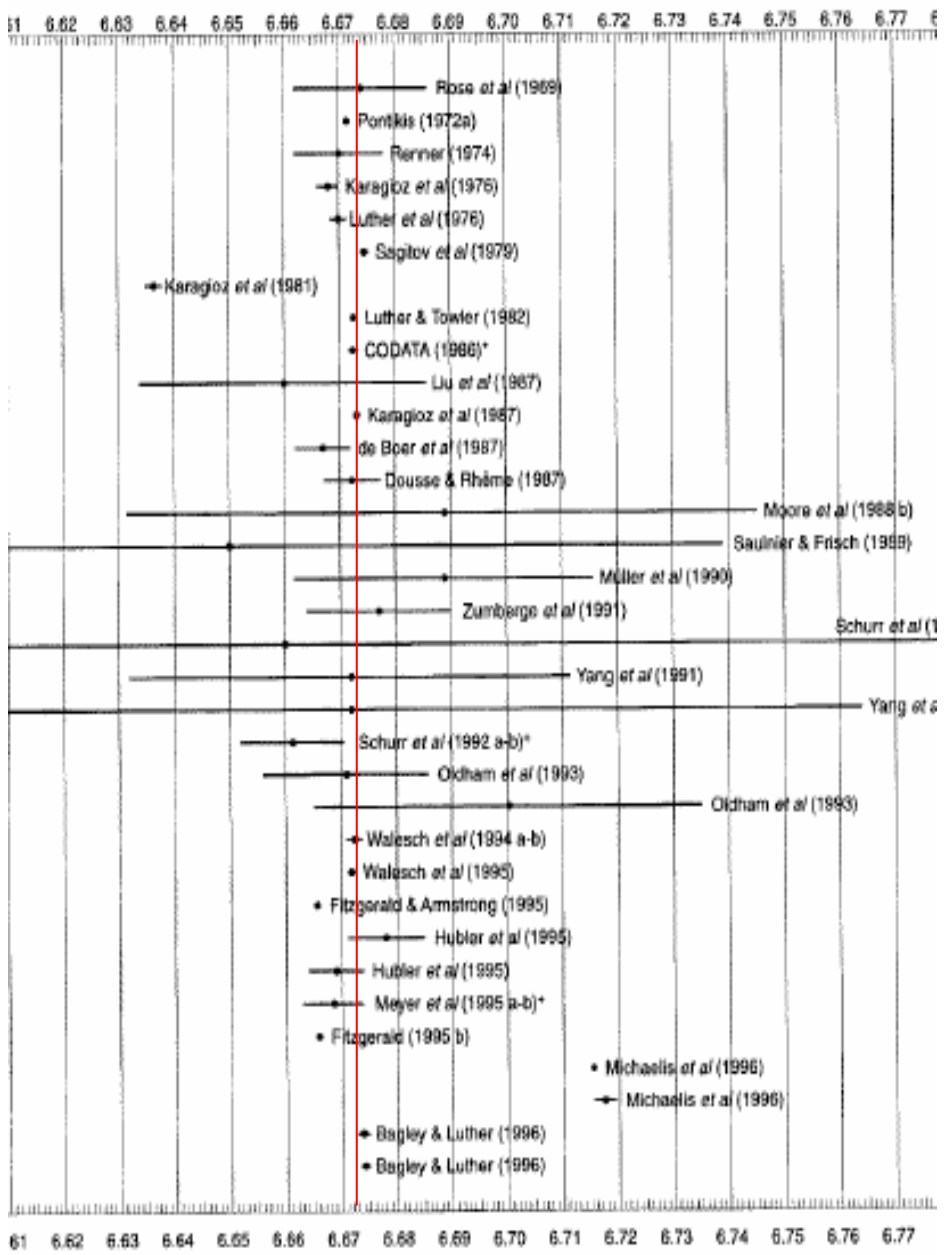
Photos. BIPM

D'infinies précautions sont nécessaires pour mesurer G

Observatoire, 1 avril 2014

Les mesures sont encore très incertaines

$$G=(6,6741\pm 0,0002)\times 10^{-11}\text{SI}$$



Les nouveaux enjeux

- Améliorer la précision sur G
- Vérifier la loi de Newton à très petite distance
- Vérifier la loi de Newton en champ très faible
- Redéfinir le kilogramme étalon autrement

Bibliographie

Histoire de la mesure de G

- *Rival M.*, Les grandes expériences scientifiques, 1996, Editions du Seuil, p59
- *Spagnol M.-L.*, L'Expérience de Cavendish : Les Expériences de Henry Cavendish et de Sir Vernon Boys. *Cahiers Clairaut*, 2003, n°103, p10

Réalisation pédagogique

- *Paturel G.*, Construction d'une balance de Cavendish, *Cahiers Clairaut*, 2003a, n°104, p25
- *Paturel G.*, Mesure de G avec la balance de Cavendish, *Cahiers Clairaut*, 2003b, n°105, p29

Article de revue sur les mesures de G

- *George T Gillies* ,The Newtonian gravitational constant: recent measurements and related studies, *Rep. Prog. Phys.* 60 (1997) 151–225