

# De la balance de Cavendish à la balance du Watt

G. Paturel et J. Flahaut

Observatoire de Lyon et Comité de Liaison Enseignants et Astronomes (CLEA)

## Résumé

L'objectif de cet article est de présenter l'expérience de Cavendish que le CLEA a faite à l'occasion de l'année mondiale de la physique. Cette expérience fut réalisée historiquement pour mesurer la masse de la Terre et ultérieurement pour déterminer la constante de la gravitation universelle. La fabrication de la balance n'est pas trop difficile mais en revanche l'expérience est assez délicate à conduire. Nous expliquons les quelques détails qui en facilitent la réussite. Une méthode originale de mesure, qui conduit à une détermination acceptable de la constante de la gravitation universelle, a été mise en œuvre. On conçoit que la limitation provient de la détermination des masses par comparaison avec le kilogramme étalon. De fait, une expérience est en cours dans les laboratoires pour construire une nouvelle définition du kilogramme étalon.

## Le principe de la balance de Cavendish

Le physicien Cavendish mit au point une balance dans l'objectif de déterminer la masse de la Terre en 1798. En réalité, le véritable enjeu de cette expérience est la détermination de la constante de la gravitation universelle.

Newton, en dépit de sa grande habileté n'avait pas pu mesurer cette constante. Il a fallu attendre l'invention simple et géniale de la balance de torsion par Coulomb, pour que la mise en évidence de l'attraction entre des masses ordinaires soit rendue possible. Cette balance de torsion a la propriété de n'avoir, à l'équilibre, aucun frottement, contrairement à une balance classique.

Le dispositif est constitué d'une baguette légère, le fléau, qui est suspendu horizontalement à un mince fil. Cavendish utilisait un fil métallique que Boys, en 1850, remplaça avec profit par un fil de quartz de seulement quelques millièmes de millimètre d'épaisseur. Le fléau de la balance peut ainsi tourner librement en tordant plus ou moins le fil de suspension.

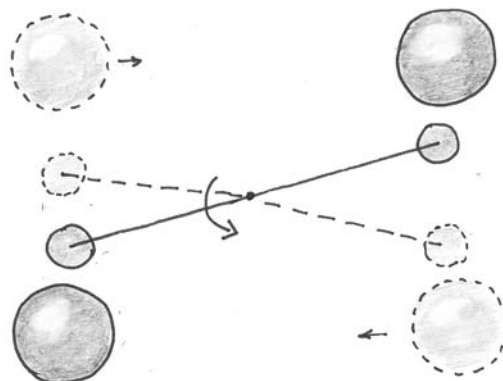


FIGURE 1 : Le principe de la balance de Cavendish. La balance de torsion est vue de dessus. Quand on déplace les grosses boules, le fléau, suspendu à un fil, tourne sous l'effet de l'attraction gravitationnelle entre les grosses et les petites boules.

Aux deux extrémités du fléau sont fixées deux petites boules en plomb. Le tout est isolé pour protéger la balance des courants d'air. Deux grosses boules en plomb sont placées à proximité des petites boules de la balance, l'une en avant, l'autre en arrière. Sous l'effet de l'attraction universelle entre les grosses boules et les petites boules, la balance adopte une position d'équilibre. En inversant la position des grosses boules, la balance adopte une nouvelle position d'équilibre (Fig. 1). La torsion équilibre les forces gravitationnelles. De la mesure de la rotation du fléau on déduit la force gravitationnelle. Cavendish déterminait la constante de torsion du fil de suspension en mesurant la période d'oscillation de la balance de torsion.

Dans notre expérience, nous avons utilisée une méthode originale de mesure qui ne nécessitait pas la connaissance des caractéristiques du fil (plus exactement du ruban) de suspension.

### Mesures historiques

En 1798 Cavendish réalise la première expérience réussie. Le fléau de sa balance mesure deux mètres de longueur. Les petites boules pèsent 0,730 kg et les grosses boules 158 kg. La rotation du fléau est mesurée en observant une de ses extrémités à l'aide d'une lunette (Fig. 2). Le fil de suspension était en argent et avait un diamètre de 50  $\mu\text{m}$ . Pour la vérité historique il faut rappeler que Cavendish réalisa de nombreuses expériences (17) en changeant les caractéristiques.

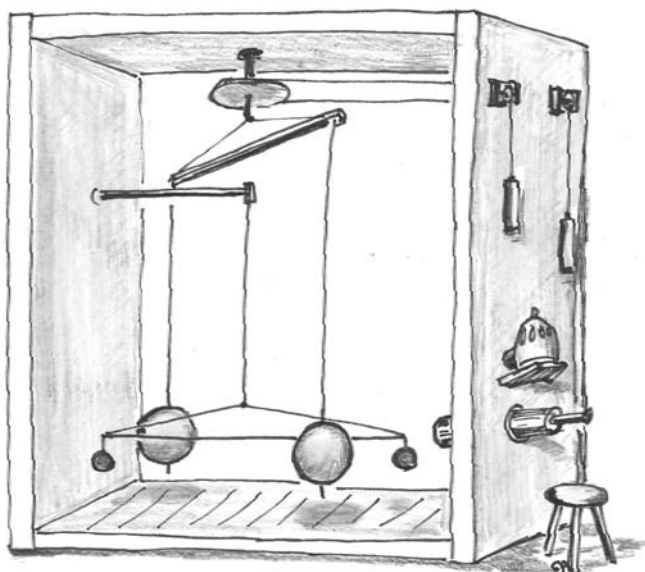


FIGURE 2 : La balance de Cavendish (1798)

L'expérience a été améliorée par Sir Charles Vernon Boys en 1895 avec une idée géniale : la balance devient plus sensible si on en réduit les dimensions (FIG 3). En effet, le couple de torsion du fil de suspension varie comme la puissance quatrième du diamètre du fil (formule de Coulomb) alors que sa charge de rupture varie comme la puissance deux du diamètre. Un fil 20 fois plus fin a une constante de torsion 160000 fois plus faible ( $20^4$ ). Même s'il ne peut porter que des masses 400 fois plus faibles ( $20^2$ ), la sensibilité est malgré tout 400 fois plus grande ( $160000/400$ ). La difficulté consiste en la manipulation

d'un fil très fin. Boys utilisait un fil de quartz de  $2\ \mu\text{m}$  de diamètre. Pour un amateur physicien, ceci est simplement irréalisable.

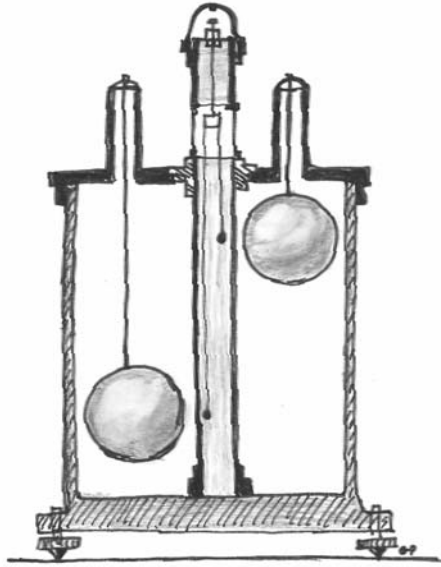


FIGURE 3 : La balance de Boys (1895). Les petites boules sont placées à des hauteurs différentes pour minimiser l'action parasite d'une grosse boule sur la petite boule opposée. Ainsi, seule subsiste l'attraction sur la petite boule proche.

### Une expérience très attractive

Dans l'expérience du CLEA, nous avons utilisé un ruban d'une dizaine de micron d'épaisseur (ruban d'aluminium ou ruban d'une cassette de magnétophone). L'avantage est d'offrir une bonne résistance à la rupture pour supporter un équipage assez lourd, mais d'avoir cependant un couple de torsion extrêmement faible. Le ruban a un mètre de hauteur. Les petites boules pèsent  $0,093\ \text{kg}$  et les grosses  $2,045\ \text{kg}$ . Le fléau est constitué d'une mince baguette de bois de  $0,20\ \text{m}$  de longueur. Un petit miroir placé au centre du fléau réfléchit un faisceau laser qui permet de mesurer avec une grande précision la rotation du fléau lors de l'inversion des grosses boules. L'angle de rotation est de l'ordre de  $0,1$  degrés.

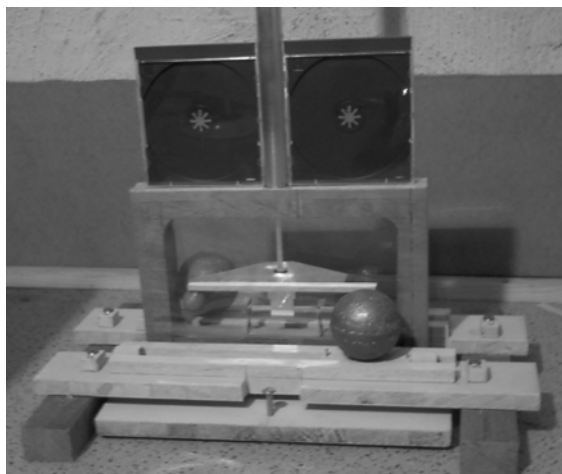


FIGURE 4 : La première balance de Cavendish du CLEA. Le déplacement des grosses boules de plomb était effectué manuellement. Notons que les boîtiers de CD ne servaient que d'équerres perdues.

Pour assurer le succès de l'expérience il est important que le fléau mobile soit enfermé dans un boîtier hermétique et que les grosses boules glissent sur des rails désolidarisés de ce boîtier. Dans notre première expérience le boîtier et les rails étaient fixés directement sur la dalle du sol.

L'originalité de l'expérience réside dans le principe de la mesure : La balance étant au repos, on inverse les grosses boules et on enregistre le temps et la position du spot laser par des photographies successives (Fig.5)



FIGURE 5 : Déplacement du spot et mesure simultanée du temps

### Exploitation des résultats

La situation peut être vue, au cours des premiers instants, comme la chute libre des petites boules sur les grosses boules avec une accélération  $a=GM/d^2$ . En première approximation, seule intervient la masse  $M$  des grosses boules. La distance de séparation  $d$ , somme des rayons des deux types de boules augmentée de la séparation tangentielle, varie peu pendant l'expérience.

En représentant le déplacement du spot en fonction du temps lors des premières secondes de l'expérience, il est aisé de déterminer la valeur de cette accélération et d'en déduire la valeur de  $G$ . Le graphique (Fig. 6) montre le résultat de la mesure, dont nous avons tiré  $G=7 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$ .

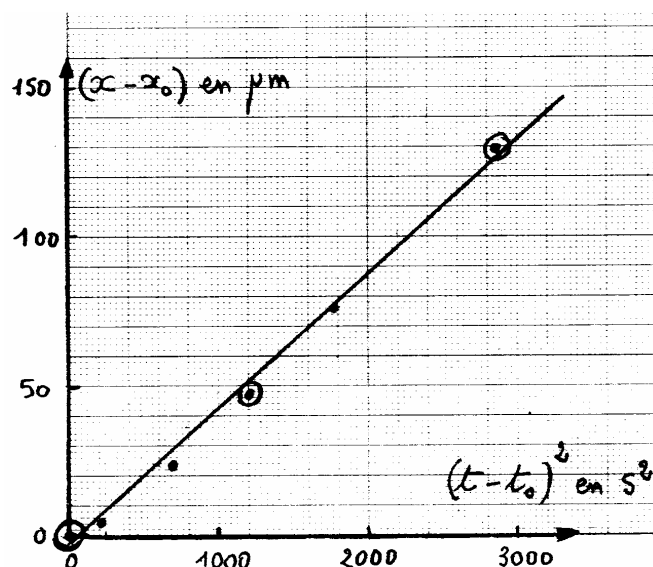


FIGURE 6 : Résultat graphique. Lors des premières secondes de l'expérience, le déplacement du spot est proportionnel au carré du temps car le ruban de suspension n'a pas encore freiné le déplacement du fléau. Les points encadrés sont ceux de la Figure 5

## Amélioration possible

Si nous pouvions prolonger la chute libre des petites boules sur les grosses boules en reculant ces dernières progressivement, nous pourrions améliorer la précision. Mais la torsion du ruban de suspension finirait par nous priver de l'hypothèse simplificatrice de chute libre. D'où l'idée de détordre le ruban progressivement au cours du mouvement des petites boules. Si les grosses boules sont reculées selon un cercle centré sur l'axe de suspension du fléau, on réalise cette double opération (recul et détorsion) en une seule fois, en asservissant la rotation de toute la balance au déplacement du fléau. Il n'est cependant pas possible de prolonger la chute libre à l'infini car la rotation s'accélérait, d'autres difficultés seraient engendrées.

Néanmoins, on conçoit que la précision puisse s'améliorer notablement avec un tel dispositif. La limitation dans la détermination de  $G$  proviendrait alors principalement de l'incertitude sur la mesure des masses  $M$ , qui doivent être comparées au kilogramme étalon.

En attendant d'avoir réalisée la balance à rotation asservie, le CLEA a construit une balance automatique commandée par un microordinateur. Cette expérience (FIG. 7), déjà présentée au public à maintes occasions, sera répétée, pendant deux mois et demi, au Palais de la Découverte, à partir du 15 septembre 2006, dans le cadre de l'opération, "un chercheur une manip".

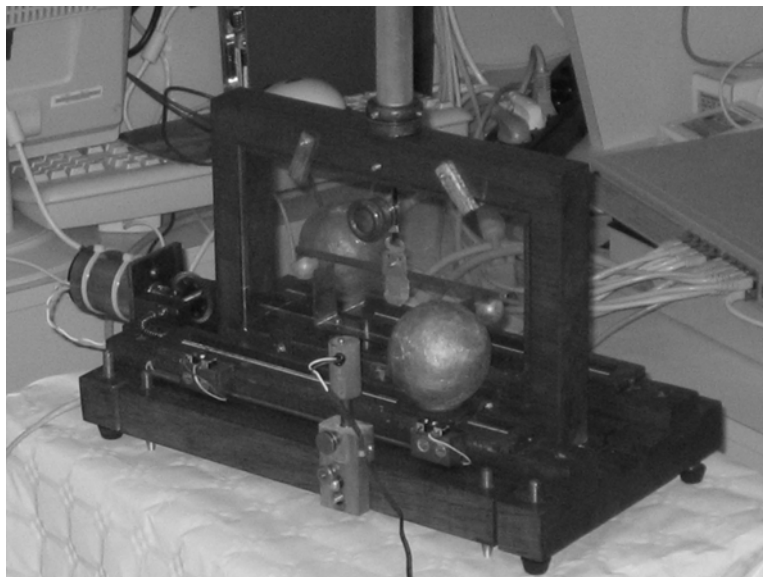


FIGURE 7 : La seconde balance de Cavendish automatisée du CLEA. Cette balance sera présentée au Palais de la Découverte à partir de la mi-septembre 2006.

## Les promesses du Watt

L'expérience de Cavendish est reproduite encore aujourd'hui dans les grands laboratoires de métrologie, car la constante  $G$  est la constante fondamentale déterminée avec la plus médiocre précision. Les publications récentes ne sont pas toutes en accord, mais, quoi qu'il en soit, la limitation finale viendra de la définition même du kilogramme étalon, dont la dérive est mise en évidence par la comparaison aux étalons secondaires.

Une expérience, dite de la balance du watt, est conduite actuellement par différents laboratoires (dont le LNE et le SYRTE de l'Observatoire de Paris) pour redéfinir le kilogramme étalon. Le principe consiste à équilibrer un poids par une force électrique dont

la mesure ne repose que sur la valeur de la constante de Planck et la détermination de fréquences. La mesure de l'accélération de la pesanteur en ce même lieu conduit à la détermination de la masse du poids mesuré. Cette accélération est mesurée par l'étude de la chute libre d'un grand nombre d'atomes froids, comme les atomes utilisés dans les horloges atomiques.

A son terme, sans doute d'ici quelques années, cette expérience permettra d'avoir une définition reproductible de l'étalon de masse, couplé ainsi à la constante de Planck.