

PESER LA TERRE, PESER LES MONDES DE LA «BALANCE A PESER LES MONDES» DE CAVENDISH (1798) AUX REPETITIONS DIDACTIQUES A L'UNIVERSITE

PIERRE LAUGINIE

GRUPE D'HISTOIRE ET DE DIFFUSION DES SCIENCES D'ORSAY (GHDSO),
UNIVERSITE PARIS-SUD, CENTRE D'ORSAY, BAT. 407, F-91405 ORSAY
CEDEX, FRANCE.

Summary: An historical overview is given from the first XVIIIth century experiments «to determine the density of the Earth» to the recent determinations of the newtonian «big G» constant. The dominant role played in this story by the gravitational torsion balance—including recent measurements—is emphasized through a detailed study of Cavendish's gravitational balance and its important technical, methodological and publishing innovations. In the framework of our «historical experiments» approach of Science and History of Science Teaching, the use of a modern pedagogical version of the Cavendish balance in a university classroom is described. The relationship of the «weighing the Earth» challenge with Astronomy is finally shortly evoked.

Key words: Earth density, Cavendish, gravitational constant, historical experiments

Introduction: *Entre répllication et enseignement académique standard*

En 1798, Henry Cavendish effectue la première pesée de la Terre entièrement en laboratoire à l'intérieur d'une petite pièce murée (Cavendish, 1798). Aujourd'hui encore, cette expérience de «pesée de la Terre» nous fascine et apparaît comme magique. Peser la Terre, y pensez-vous? Et que dire de faire exécuter l'opération *aujourd'hui* en une petite journée, par des étudiants de premier cycle scientifique, certes avec une précision moindre qu'il y a deux siècles, mais sans que les concepts originaux soient trahis!

La réflexion qui est ici proposée est issue de notre approche expérimentale de l'enseignement de l'Histoire des Sciences: apporter, via la réalisation d'expériences «historiques», un support concret ouvrant sur l'Histoire des sciences, ou venant en complément d'un enseignement d'Histoire des sciences.

La «réplication à l'identique» d'expériences historiques est une activité de pleine recherche fondamentale, telle celle menée, par exemple, au laboratoire de répllication de l'université d'Oldenburg en Allemagne. Elle vise à apporter à l'Histoire des sciences des éléments absents des documents qui nous sont parvenus, soit qu'ils aient disparu, soit du fait d'une sélection, souvent inconsciente, de faits jugés significatifs (les «tours de main» n'étaient pas mentionnés). Cependant, une telle activité de laboratoire n'est pas à la portée d'un service d'enseignement d'université. Alors, que peut-on faire? Accepter un niveau intermédiaire: reproduire en salle des expériences historiques manipulées par les étudiants, *avec des contraintes réduites mais en respect complet des concepts originaux*. Nous verrons, sur l'exemple concret de la «pesée de la Terre» ce que nous entendons par là.

Les prémices

Cavendish «pèse la Terre» en 1798 (Cavendish, 1798). Mais comment en est-on arrivé là? Au XVIII^e siècle, la motivation envers la masse de notre planète n'est pas principalement d'ordre astronomique, c'est d'abord une affaire de géologues. La vraie question est celle de la densité moyenne de la Terre, qui apporterait un premier élément de réponse à l'intrigante question: qu'y a-t-il sous nos pieds? et nous savons bien qu'il est plus facile, encore aujourd'hui, de connaître l'intérieur du Soleil que celui de notre planète. Et c'est un géologue de formation, le révérend John Michell, qui construira le premier prototype de la «balance» dont héritera en final Cavendish.

Comment procéder? Newton lui-même a montré la voie, proposant deux techniques. Précisons bien que dans toute cette histoire, la loi de gravitation universelle, prouvée par le mouvement des planètes, *en inverse carré de la distance*, est acceptée *a priori*, et même que l'on admet, faute de mieux (Cavendish le précisera) sa validité aux très courtes distances. Il ne s'agit pas de la démontrer, mais de l'utiliser pour une expérience précise de Métrologie. Que propose Newton à la fin du XVII^e siècle?

Soit une masse d'épreuve m . Elle est soumise à l'attraction de la Terre, de masse M_T , via une force connue qui est son poids $P (= mg)$. On la soumet à l'attraction d'une autre masse

M connue, placée à distance d connue. Soit F cette attraction. Si nous pouvons mesurer F , alors le rapport F/P n'est autre que le rapport des masses agissantes, corrigé du rapport inverse des carrés des distances, soit $(M/M_T) * (R_T/d)^2$ où R_T est le rayon de la Terre (connu depuis l'Antiquité). D'où l'on tire M_T , puis la densité de la Terre. Toute la difficulté est de mesurer la force F , extraordinairement petite! Newton propose deux méthodes:

dans la première, la masse m est au bout d'un fil à plomb, la masse M est une montagne voisine, et la force F est mesurée à partir de la déviation du fil à plomb par rapport à la verticale (déterminée astronomiquement).

dans la seconde, la masse M est une «grosse» boule de plomb, placée aussi près que possible de la masse d'épreuve. La mesure s'effectuera «en laboratoire», pourvu que l'on trouve le moyen d'évaluer une force aussi petite.

Newton déclarait lui-même ne croire en aucune des deux techniques, tant leur mise en œuvre lui paraissait difficile.

La première méthode sera tentée par Bouguer lors de l'expédition dans les Andes du Pérou (1735-1740) avec une montagne volcanique, le Chimborazo. Bien que le résultat ne fût pas concluant (la déviation attendue est de l'ordre de la minute d'arc), il avait montré la voie. Elle sera reprise en 1774-1776 par Maskelyne et Hutton avec une montagne de forme simple et de constitution géologique estimée homogène, le mont Shihallien en Écosse (Maskelyne, 1775; Hutton, 1778). Après avoir publié une première valeur de 4.5 pour la densité de la Terre, le résultat sera rectifié ultérieurement à «presque cinq fois la densité de l'eau» après une estimation plus vraisemblable de la densité de la montagne, alors que la densité de la croûte n'est que de 2.0 à 2.5 (Hutton, 1809). C'est remarquable: on sait déjà qu'il y a principalement des éléments lourds à l'intérieur du globe. Signalons qu'à cette occasion, Hutton effectuera un extraordinaire travail de «survey», à la fois inventant la représentation par lignes de niveau et inaugurant une technique élaborée d'intégration numérique par découpage en cylindres élémentaires verticaux pour évaluer l'attraction de la montagne sur le fil à plomb. Mais la méthode touche à ses limites en ce qu'elle repose entièrement sur une estimation *a priori* de l'homogénéité et de la densité de la montagne.

La mesure de Cavendish

Une mesure en «laboratoire» s'impose donc à la fin du XVIII^e siècle. Cavendish reconstruit presque entièrement un prototype élaboré quelques années auparavant par John Michell;¹ il lui applique des critères de méthodologie, de rigueur et de précision inusités jusqu'alors, de sorte que l'on parle habituellement de «l'expérience de Cavendish». La technique utili-

1. John Michell construit le premier prototype de la balance gravitationnelle dans les années 1780. Les occupations, puis la maladie et la mort l'empêcheront de mener le projet à son terme.

sée pour mesurer la force F est celle de la balance de torsion, inventée indépendamment et presque simultanément par Michell et par Coulomb. Aujourd'hui encore, le pendule de torsion conserve ce statut d'excellence pour la mesure des forces faibles, et il sera encore utilisé dans des versions modernes de la balance de Cavendish au début du XXI^e siècle. C'est donc le bon choix! Les masses d'épreuve m ou «balles» (balls), de 730g chacune sont placées aux deux extrémités d'un fléau d'une toise de long (1.83 m) suspendu à un fil de torsion (voir fig. 1); le tout est protégé dans un cabinet en acajou. Les masses agissantes M ou «poids» (weights), chacune de 158 kg (un pied de diamètre), suspendues à un chevalet, sont approchées au plus près des premières, symétriquement. Sous l'action de l'attraction gravitationnelle entre masses, le fléau dévie et adopte une nouvelle position d'équilibre. De la déviation observée (une fraction de degré), on déduit la valeur de la force F . Cela exige la connaissance de la constante de torsion du fil, laquelle est déduite de la période des oscillations du fléau. Afin de ne pas perturber l'expérience par la propre masse de l'opérateur et par ses effets thermiques, l'ensemble est installé dans une pièce spéciale murée, la commande des poids s'effectue de l'extérieur à l'aide d'une poulie; l'extrémité du fléau se déplace devant une petite échelle en ivoire munie d'un vernier autorisant la précision du centième de pouce, la précision sur l'orientation du fléau atteignant la minute d'angle. Encore faut-il pouvoir lire l'échelle à travers le mur! À cet effet, une fenêtre est

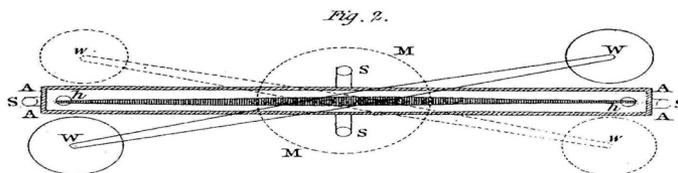
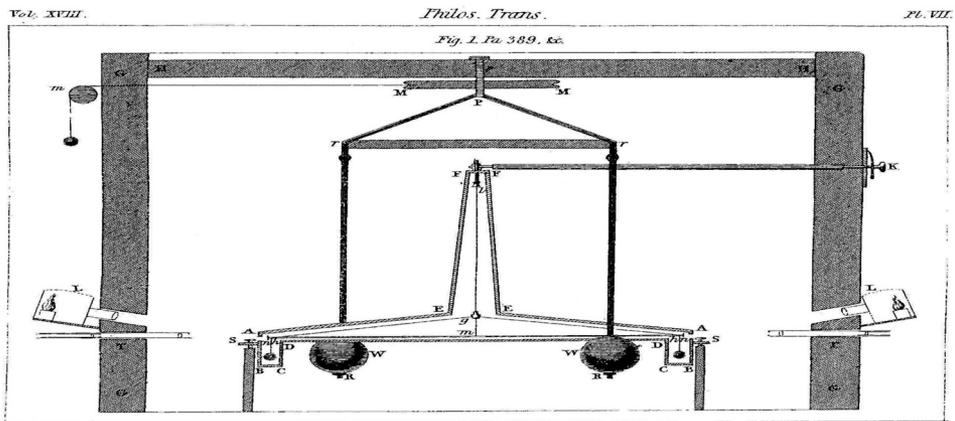


Figura 1. Schéma original de Cavendish pour l'expérience de pesée de la Terre en 1798.

percée dans la paroi du cabinet contenant le fléau et une petite lunette d'observation est placée dans la paroi du mur; l'échelle en ivoire est éclairée à distance, à travers le mur, par une sorte de lanterne de projection dont la source est une bougie! Voilà donc un formidable montage, tant par ses dimensions que par la précision qu'il autorise et par les obstacles surmontés.

L'article de Cavendish aux *Philosophical Transactions* de 1798 (Cavendish, 1798) est innovant par bien des aspects, et il a même pu être considéré comme la première publication scientifique *moderne* (Everitt, 1977). Coulomb, en 1785, pour emporter la conviction d'une Académie déjà pratiquement acquise, choisit de présenter un triplet de valeurs —un seul— pour illustrer la mise en évidence de la loi en inverse carré pour l'Electrostatique (Coulomb, 1785). Cavendish, au contraire, publie un double ensemble de résultats (29 en tout) obtenus avec deux fils différents, il examine séparément la moyenne de chaque série, donne l'ensemble des paramètres expérimentaux, avec dates et circonstances. Il y a une recherche approfondie de toutes les causes possibles de perturbations et d'erreurs, incluant les effets thermiques, magnétiques, et gravitationnels (influence de la paroi du cabinet, donnant lieu à une magistrale démonstration de l'effet gravitationnel d'un plan massif), avec discussion détaillée de toutes les approximations. On y trouve une belle leçon d'analyse dimensionnelle: tout est exprimé en fonction des seules grandeurs fondamentales longueur, masse, temps, aucune grandeur dérivée n'apparaît jamais! Par exemple, l'accélération de la pesanteur (nécessaire pour la masse de la Terre) s'introduit sous la forme de «la longueur du pendule battant la seconde sous cette latitude». Il est tenu compte du changement de fréquence d'oscillation du fléau dû au fait que la «balle» oscille dans le champ du «poids», lequel n'est pas uniforme. Et cela donne lieu à une extraordinaire astuce de résolution de ce problème non harmonique, évitant tout calcul à l'expérimentateur. Ce changement de fréquence sera par ailleurs à la base d'une méthode moderne de détermination de la constante de gravitation avec une balance de torsion à la fin du xx^e siècle (Luther & Towler, 1982). Mentionnons également le scrupule de Cavendish à utiliser, pour des distances de l'ordre de 20 cm, une loi en inverse carré (indispensable pour la masse de la Terre) qui n'a été testée que sur des distances astronomiques. Faute de mieux, il conclut «qu'il n'y a pas de raison d'observer un changement», mais il a eu le mérite de poser la question. Il fait, de plus, un test —négatif— pour évaluer l'effet éventuel des «forces de cohésion» (nous dirions aujourd'hui «de Van der Waals») lorsque le «poids» est très proche de la surface du cabinet.

Cavendish obtient pour la densité moyenne de la Terre la valeur 5.48, à moins de 1% de la valeur moderne (5.517). Une analyse statistique de ses résultats conduit à une incertitude de +/- 1.5% à deux écarts-types. Excellent! Bien des mesures d'aujourd'hui, dans des domaines différents, ne font pas mieux. Pour fixer les idées, notons que la force subie par la «balle» de la part du «poids» n'est que la cinquante-millionième partie du poids de ladite balle. Cependant, le résultat de Maskelyne et Hutton possède alors une tel-

la force que Cavendish n'entraîne pas immédiatement la conviction du monde scientifique: A. Libes, puis surtout Baily, émettront des doutes sur la valeur conclusive de ce travail (Libes, 1813; Baily, 1842; Heilbron, 1994). Les critiques s'appuient principalement sur le fait que l'incertitude, à cette époque, est encore souvent estimée —à tort— à partir de la dispersion brute des mesures (laquelle augmente avec le nombre de mesures) plutôt qu'à partir de l'écart-type réduit qui tient compte de la réduction de l'incertitude avec le nombre de mesures. Une erreur numérique dans la table de résultats de Cavendish lui a été également reprochée; nous donnons raison de ce dernier point dans la référence (Lauginie, 2007).

La Terre et la constante universelle de gravitation

Finalement, Cavendish donne une série de déterminations de la densité de la Terre, et rien que cela. La masse de la Terre elle-même n'apparaît pas (quel intérêt de savoir combien de millions de milliards de milliards de pound-avoirdupois cela fait?). *A fortiori*, il n'est pas question de la constante de gravitation G qui n'apparaît nulle part (ni même, évidemment, chez Newton), et qui n'entre pas dans les problématiques de l'époque (voir aussi: Clotfelter, 1987). Cavendish répond à une préoccupation de géologues et seulement à cela, et il raisonne en termes de pures proportions. Cependant, son résultat contient implicitement la constante de gravitation: en effet, écrivant la loi de gravitation sous sa forme moderne: $F = GMm/d^2$, on voit que la connaissance de la force F (mesurée par Cavendish) donne directement la constante G . Il faut d'ailleurs ajouter la connaissance de l'accélération de la pesanteur g pour passer à la masse de la Terre, de sorte que les répétitions modernes de cette expérience, notamment à l'université, sont présentées aujourd'hui, à juste titre, le plus souvent comme une détermination directe de la constante de gravitation. Cependant, dans un enseignement d'Histoire des sciences, il est préférable de présenter la mesure dans son contexte d'époque «à la Cavendish».

L'intérêt pour la constante de gravitation prendra le dessus seulement à la fin du XIX^e siècle, et par exemple, lors de la magistrale répétition effectuée par Boys en 1895, elle sera considérée, à cause de son universalité, comme le seul but de l'expérience (Boys, 1895; 1897).

Après la détermination de Boys, qui fera référence pendant plusieurs dizaines d'années, l'intérêt pour une détermination plus précise de la constante de gravitation renaît tout à la fin du XX^e siècle; en 1998, la valeur officielle est encore $6.67 \cdot 10^{-11}$ SI avec un écart-type de 0.01, donc la décimale 7 n'est même pas certaine! Trois déterminations récentes méritent d'être citées, aboutissant à 6.674 ou $6.675 \cdot 10^{-11}$:

— utilisation d'une balance de torsion ultra-sophistiquée «à la Cavendish» pour les deux premières: soit par une méthode de zéro, torsion nulle du fil grâce à une mesure dynamique avec effet de feed-back, par le groupe Eöt-Wash (Gundlach, Merkowitz: 2000);

soit, au BIPM de Sèvres, une utilisation originale du fil de torsion chargé aux 2/3 de sa rupture (équipement très lourd!), dans laquelle l'énergie potentielle due au fait que le fléau s'élève légèrement lors de la torsion domine l'énergie élastique (Quinn, 1997; 2001). Dans les deux cas, on s'affranchit des variations des propriétés du fil liées à l'hystérèse solide.

— Retour à une balance «normale» par un groupe de Zurich, selon un procédé déjà initié par Poynting et Von Jolly à la fin du XIX^e siècle (Poynting, 1894): une masse de 13.6 tonnes de mercure (1000 litres!) est placée au-dessus de l'un des plateaux (sans toucher); puis on la fait écouler dans un récipient identique placé au-dessous, l'équilibre est alors rompu (Schlamminger *et al.*, 2002).

Enfin, bien dans l'esprit de la question posée autrefois par Cavendish, il est juste de mentionner une vérification de la loi en inverse carré jusqu'à des distances de l'ordre de 0.2 mm par le groupe Eöt-Wash, encore avec leur balance de torsion (Hoyle *et al.*, 2001).

Toutefois, il est un autre intérêt —considérable— à la pesée de la Terre: c'est l'extrapolation à la pesée du système solaire. Newton avait bien posé le problème, lui qui, se fondant sur la troisième loi de Képler (reliant périodes des planètes à leur distance au soleil),² avait déjà établi les masses relatives de la Terre, du Soleil et des planètes à satellites telles Jupiter ou Saturne (Newton, 1714). Masses seulement *relatives*, bien entendu. La détermination de la valeur absolue de l'une d'elles, la Terre, un siècle plus tard, les donnera toutes d'un seul coup. Newton l'avait bien vu, lui qui s'était ingénié à «prédire» une valeur de la densité de la Terre comprise entre 5 et 6! (Newton, 1714).³ Ainsi, le Soleil est «léger», densité moyenne environ 1.4. L'extension aux autres planètes pourra se faire ultérieurement à partir des perturbations mutuelles via l'utilisation, implicite ou explicite, de l'intensité de l'interaction gravitationnelle illustrée par *G*. Intérêt considérable pour l'Astronomie! D'où la belle dénomination attribuée plus tard par les géologues à la balance de Cavendish: «la balance à peser les Mondes».

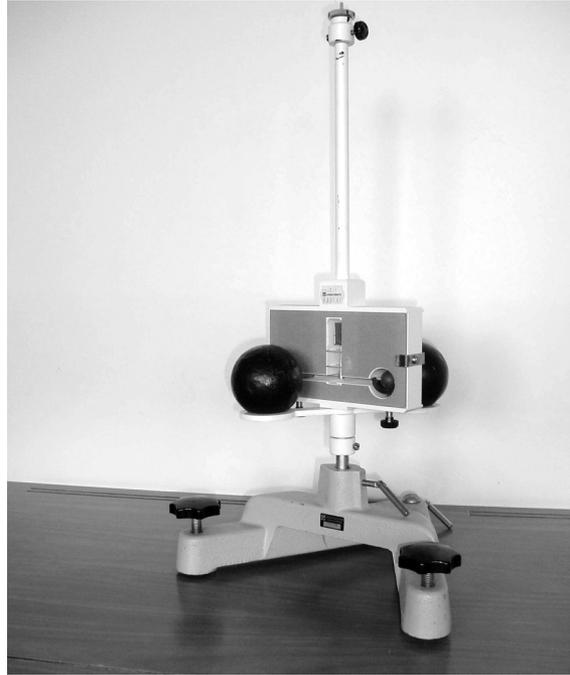
La balance gravitationnelle aujourd'hui à l'université

La balance de torsion —perfectionnée— subsiste donc au XXI^e siècle comme instrument de recherche sensible en Métrologie. Mais il y a plus: sous une forme miniaturisée (cf. fig. 2), dans la filiation de Boys, la balance de Cavendish est aujourd'hui un magnifique instrument pédagogique *et qui marche*. Certes, la précision que peut espérer un étudiant est plus proche des 10% que du 1,5 % de Cavendish, mais, dans ce cadre, la mesure est bien reproductible.

2. Formulation moderne: $T^2/a^3 = 4\pi^2/GM$ où *T* est la période orbitale de la planète ou du satellite, *a* le demi grand axe de l'orbite, et *M* la masse de l'astre exerçant la force centrale (Soleil ou Jupiter par exemple).

3. «Ainsi comme la terre est ordinairement à sa surface environ deux fois plus pesante que l'eau, et qu'en fouillant plus avant, elle est trois, quatre, et même cinq fois plus dense: il est vraisemblable qu'il y a environ cinq ou six fois plus de matière dans le globe de la Terre que s'il n'était formé que d'eau, surtout puisqu'on vient de faire voir que la Terre est environ quatre fois plus dense que Jupiter» (Traduction par Mme du Châtelet, 1756).

Figura 2. La balance de gravitation miniaturisée utilisée en enseignement. Remarquer le petit miroir solidaire du fléau, permettant d'utiliser la méthode de Poggendorf.



La balance de Cavendish est un exemple typique de notre approche de l'Histoire des sciences à partir de la «reproduction» d'expériences historiques. Ainsi que nous l'annonçons dans l'Introduction, *adaptation aux nécessités de l'enseignement* par relâchement d'une partie des contraintes inhérentes à une stricte réplique, mais simultanément *strict respect des concepts de base*:

— *Les adaptations*: la balance est miniaturisée, comme Boys l'avait recommandé, un siècle plus tôt, voir fig. 2 (fléau de 10 cm, «balles» de 15 g aux extrémités du fléau, «poids» extérieurs de 1.5 kg); la méthode de Poggendorf (inventée seulement en 1826) est utilisée pour détecter les déviations et oscillations du fléau; le faisceau lumineux nécessaire est fourni par un petit laser; moyennant quoi, sur un mur placé à 10 m, la distance entre les positions des spots correspondant aux deux positions d'équilibre symétriques du fléau («poids» d'un côté, puis de l'autre, cf. fig. 1) est d'environ 31 cm. L'attraction gravitationnelle est parfaitement palpable!

— *Le respect des concepts de base*: malgré les adaptations, la procédure demeure très proche de l'original. Le montage est miniaturisé, mais, à part cela, tout à fait semblable à celui de Cavendish, tous les éléments (fil, fléau, balles et poids) sont identifiables et visibles. Un point très important, qui conditionne entièrement la procédure, est la période des oscillations du fléau: 15 mn ou 7 mn chez Cavendish selon le fil utilisé, et 10 mn chez nous. Ainsi, avec un fil plus fin et un équipage plus léger, les étudiants travaillent néanmoins dans des conditions

similaires à celles de Cavendish. Comme recommandé par Cavendish, on n'attend pas l'équilibre du fléau (qui demande des heures), on le détermine à partir de l'observation et l'enregistrement des premières oscillations (un relevé toutes les 30 s pendant plusieurs périodes, voir fig. 3). Autre point important: la force d'interaction mesurée entre «balle» et «poids» est environ un deux-cent-millionième du poids de la balle, au lieu d'un cinquante-millionième chez Cavendish: les ordres de grandeurs sont, là encore, respectés. Et la déviation du fléau (environ un demi-degré) reste également du même ordre que chez Cavendish.

Enfin, il n'y a pas de *boîte noire* et l'étudiant apprend autre chose que ce qui lui est enseigné habituellement: la patience (expérience très lente), l'obstination (cela peut rater, et ça arrive, comme dans la vraie science), l'attention, la gestion des effets perturbateurs extérieurs, il apprend aussi une belle tranche d'Histoire. Il a pesé la Terre! Et le Soleil. Boys, dans son article de 1897, minimisait l'intérêt de la détermination de la densité de la Terre, planète «particulière», au regard de «l'universalité» de la constante de gravitation. Nous ne le suivons pas entièrement sur ce point: avec sa «balance à peser les Mondes» Cavendish a réalisé en puissance, pour la première fois avec une précision de l'ordre du pourcent, une véritable pesée du système solaire. Peu d'expériences de Physique offrent à l'étudiant d'aujourd'hui l'occasion d'affirmer, comme Cavendish, au soir d'une journée de mesures: «aujourd'hui, j'ai pesé la Terre», tout en lui ouvrant une telle fenêtre sur l'Univers.

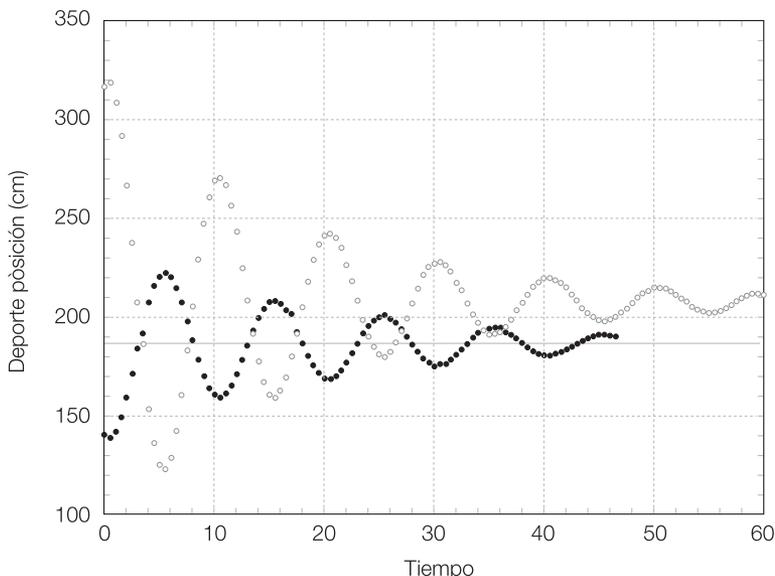


Figura 3. Un enregistrement d'étudiants. Les courbes représentent les oscillations du spot sur un écran placé à 7.40 m de la balance, pour chacune des positions des «poids» (voir fig. 1). Les positions d'équilibre sont indiquées par 2 traits pleins horizontaux. Elles diffèrent d'environ 21.5 cm

Bibliographie

- BAILY, F. (1842), *Phil. Mag.*, **21**, 111.
- BOYS, C. V. (1895), «On the newtonian constant of Gravitation», *Phil. Trans. of the Royal Society*, **186**, 1-72.
- BOYS, C. V. (1897), «La constante de la gravitation» (version réduite de l'article original, en français). In: *Rev. générale des sciences pures et appliquées*, **8**, 46-54.
- CAVENDISH, H. (1798), «Experiments to Determine the Density of the Earth», *Phil. Trans. of the Royal Society of London*, **88 (17)**, 469-526. Re-édition (texte intégral): «To Determine the Density of the Earth» (1809). In: HUTTON, C.; SHAW, G.; PEARSON, R. (eds.), *The Philosophical Transactions of the Royal Society of London, from their commencement, in 1665, to the year 1800; Abridged, with notes and biographic illustrations*, **xviii** (Anno 1798), 388-408. Traduction française, CHOMPRÉ, M. N. M. (1815), «Expériences pour déterminer la densité de la Terre», *Journal de l'École Polytechnique, Paris*, tome **x**, 17^e cahier, 263-320. Version réduite commentée (calculs omis) (1959), in: SHAMOS, M. H. (ed.), *Great experiments in Physics*, Holt, Rinehart and Winston, N.Y., chap. 6, 75-92; ré-édition: 1987, Dover.
- CLOTFELTER, B. E. (1987), «The Cavendish experiment as Cavendish knew it», *Am. J. Phys.*, **55**, 210-213.
- COULOMB, C. (1785), «Premier Mémoire sur l'Electricité et le Magnétisme». In: (1788) *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, année 1785, 569-577.
- EVERITT, C. W. F. (1977), «Gravitation, Relativity and Precise Experimentation». In: *Proc. of the First Marcel Grossmann Meeting on General Relativity*, North-Holland, Amsterdam, 545-615.
- GUNDLACH, J. H.; MERKOWITZ, S. (2000), «Measurement of Newton's Constant Using a Torsion Balance with Angular Acceleration Feedback», *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2.869-2.872.
- HEILBRON, J. L. (1994), *Restaging Coulomb - Usages, controverses et répliques autour de la balance de torsion*, BLONDEL, C. & DÖRRIES M. (eds.), Leo S. Olschki, Firenze, 151-161.
- HOYLE, C. D.; SCHMIDT, U.; HECKEL, B. R.; ADELBERGER, E. G.; GUNDLACH, J. H.; KAPNER, D. J.; SWANSON, H. E. (2001), «Submillimeter Test of the Gravitational Inverse-Square Law: A Search for Large Extra Dimensions», *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 1.418-1.421.
- HUTTON, C. (1778), «An account of the Calculations made from the Survey and Measures made at Schihallien, in order to ascertain the Mean Density of the Earth», *Phil. Trans. of the Royal Society of London*, **Lxviii**, 689-788.
- HUTTON, C. (1809), «An account of the Calculations made from the Survey and Measures made at Schihallien, in order to ascertain the Mean Density of the Earth» (abstract). In: HUTTON, C.; SHAW, G.; PEARSON, R. (eds.), *The Philosophical Transactions of the Royal Society of London, from their commencement, in 1665, to the year 1800; Abridged, with notes and biographic illustrations*, **xiv**, 408-423.
- LAUGINIE, P. (2003), «La pesée de la Terre», *Pour la Science, Dossier hors-série «La gravitation»*, **38**, janvier-avril 2003.
- LAUGINIE, P. (2007), «Weighing the Earth, weighing the Worlds, from Cavendish to modern undergraduate demonstrations». In: HEERING, P.; OSEWOLD, D. (eds.), *Constructing Scientific Understanding through contextual Teaching*, Frank & Timme, Berlin, 119-137.
- LIBES, A. (1813), *Traité complet et élémentaire de Physique*, Paris, vol. 3, 182.
- LUTHER, G. G.; TOWLER, W. R. (1982), *Phys. Rev. Lett.*, **48**, 121.
- MASKELYNE, N. (1775), «A Proposal for measuring the Attraction of some Hill in this Kingdom by Astronomical Observations», *Phil. Trans. of the Royal Society of London*, **Lxv**, 494 and 500.
- NEWTON, I. (1714), *Principia*, second edition, 1756, *traduction française par Madame du Châtelet*, ré-édition (20059, Dunod, Paris, 311.
- POYNTING, J. H. (1894), *The mean Density of the Earth*, C. Griffin & Co, London.
- QUINN, T. J. (1997), «Novel torsion balance for the measurement of the newtonian gravitational constant», *Metrologia*, **34**, 245-249.
- QUINN, T. J. (2001), «A new Determination of G using two Methods», *Phys. Rev. Letters*, **87**, 111101, 1-4.
- SCHLAMMINGER, S.; HOLZSCHUH, E.; KUNDIG, W. (2002), *Phys. Rev. Lett.*, **89**, 161102.