LA CONSTANTE DE LA GRAVITATION

Par la découverte de sa célèbre loi de l'attraction de la matière, Isaac Newton put ramener les trois lois de Kepler, auxquelles obéissent les mouvements des astres, à un principe d'une idéale simplicité. Il montra aussi qu'un corps sphérique, homogène, ou dont la densité ne varie que par couches concentriques, attire les corps extérieurs de la même manière que s'il était entièrement ramassé en son centre. Ce sont, soit dit en passant, les difficultés que rencontra Newton dans la démonstration de ce théorème, et non point, comme on le croit communément, la valeur erronée de la distance de la Terre à la Lune, qui l'empêcha de publier plus tôt sa grande découverte.

Bien que la loi de Newton suffise pour expliquer le mouvement des planètes et de leurs satellites, celui des comètes, des étoiles doubles et le phénomène de la marée, et même pour comparer entre elles les masses des corps célestes, il est une chose qui échappe aux recherches astronomiques : c'est la possibilité de déterminer ces masses en valeur absolue. Nous savons que Sirius est équivalent à vingt-huit fois notre Soleil ; que ce dernier possède une masse 1.048 fois supérieure à celle de Jupiter ; mais aucune observation de ces corps ne nous indique le nombre de tonnes de matière qu'ils contiennent.

La simple considération de la force centrifuge nous dit que le Soleil attire chaque tonne de la matière terrestre avec une force voisine d'un demi-kilogramme et que, sans cette force, notre Globe continuerait sa route en ligne droite; mais les observations astronomiques ne nous permettent pas de dire combien de tonnes de matière se trouvent en présence.

Dans sa forme générale, la loi de Newton est une simple proportion : la force F de l'attraction mutuelle de deux masses m_1 et m_2 séparées par une distance r est proportionnelle au quotient que l'on obtient en divisant le produit des masses par le carré de leur distance. Pour transformer cette proportion en une égalité, nous devons y introduire un certain coefficient numérique : la *constante Newtonienne de la gravitation*, que nous appellerons G, ce qui donne l'égalité :

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Newton montra déjà que deux méthodes distinctes conduisent à la détermination de cette constante : l'une d'elles consiste à observer les perturbations que font subir à la gravité certaines portions de notre Terre, des montagnes ou des couches sphériques ; l'autre se réduit à créer une planète artificielle et à mesurer la valeur entière de son attraction.

Dans le premier cas, on observera la valeur et la direction de la gravitation au voisinage d'une montagne, ou sa valeur seulement dans une mine profonde ; c'est cette méthode qu'employa Bouguer, au risque de sa vie, dans les ouragans de neige du Chimborazo ; des expériences analogues ont été faites par Maskelyne, par Airy et par d'autres observateurs; je renverrai, pour la description de ces observations, à l'historique qu'en a fait récemment M. Poynting, et je ne m'occuperai ici que de la deuxième méthode, fondée sur l'emploi d'une planète artificielle.

I

Il est bon de nous faire dès maintenant une idée de la petitesse des effets qu'il s'agit de mesurer. Un mur que l'on a construit en s'aidant du fil à plomb, est-il vertical ou présente-t-il une inclinaison quelconque? Le principe de Newton nous dit qu'il attire la masse suspendue; et cependant le fil qui la supporte est vertical, l'attraction est si faible qu'il est impossible de la déterminer par ce procédé. L'action même d'une montagne exige les moyens les plus délicats pour être mise en évidence. Si nous plaçons deux billes sur une table bien nivelée, elles ne roulent pas l'une vers l'autre; et, si même elles étaient mille fois plus lisses, nous ne percevrions aucun mouvement dû à leur attraction mutuelle.

Dans tous les laboratoires de Physique, on trouve des instruments de la plus grande sensibilité, comme on se plaît à les qualifier. Quelles précautions prend-on pour éviter que l'attraction de leurs différents organes faussent les résultats des mesures auxquelles ils sont destinés? Aucune. Les attractions sont si faibles que, dans aucun appareil construit jusqu'à présent pour la mesure des actions électriques, magnétiques, thermiques ou autres, il n'a paru nécessaire de les éviter. Et cependant ces attractions existent; même elles peuvent être mesurées par des moyens suffisamment délicats. Le Révérend John Mitchell imagina le premier un appareil propre à effectuer cette mesure : il construisit la balance de torsion avec laquelle Coulomb fit ses fameuses expériences ; mais il mourut avant d'avoir pu exécuter lui-même aucune recherche.

Cavendish reconstruisit l'appareil de Mitchell, et à l'aide de cet instrument, il mesura l'attraction qui s'exerce entre deux sphères de plomb ayant respectivement 12 pouces et 2 pouces de diamètre, avec leurs centres à 8,85 pouces l'un de l'autre.

La même expérience a été refaite par Reich, par Baily et plus récemment par MM. Cornu et Baille; ces deux éminents physiciens réduisirent au quart l'appareil de Cavendish, auquel ils apportèrent d'importants perfectionnements. Toutes ces mesures, ayant été faites à l'aide de masses connues, ont permis de déterminer G avec une précision plus ou moins grande.

Il ne sera pas inutile de faire remarquer que cette constante de Newton n'a rien de commun avec cette autre quantité, désignée par g, qui représente l'attraction à la surface de la Terre; cette dernière est purement accidentelle; elle dépend non seulement de G, mais aussi de la grandeur de la Terre, de sa densité moyenne, de la latitude du lieu, de l'attitude et de la configuration de toute la contrée. La quantité g est d'un caractère éminemment pratique; G, au contraire, personnifie ce principe puissant sous l'influence duquel chaque étoile de l'Univers se meut dans l'espace; il se peut aussi qu'il soit la cause des actions chimiques. A l'inverse de toutes les influences physiques connues, la force d'attraction est indépendante du milieu, n'éprouve pas de réfraction et ne projette pas d'ombre ; c'est un pouvoir mystérieux que personne ne peut expliquer; chacun ignore les lois de sa propagation dans l'espace; il ne dépend, en aucune manière, de la grandeur accidentelle de la Terre; si le système solaire cessait d'exister, ce principe lui survivrait sans aucune modification.

II

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 la *densité moyenne de la Terre* ou encore, avec moins de précision, le *poids de la Terre*. Notre globe n'est pas plus intimement lié à cette mesure qu'une table ne l'est aux appareils qu'elle supporte. La Terre n'a fait guère que gêner mes expériences en les troublant toujours et en brisant, de temps à autre, les fils de quartz dont je me servais. Les recherches de cette nature pourraient être faites avec plus de précision sur la Lune ou sur une petite planète; mais il faut y renoncer pour le moment.

Je ne puis pas décrire ici les expériences antérieures à celles que j'ai faites moi-même; je me bornerai à reproduire, d'après le mémoire de M. Poynting « *Sur la densité moyenne de la Terre* », les résultats de ces mesures résumées dans le tableau I.

Tableau I. — Mesures antérieures de G.

DATE	OBSERVATEUR	MÉTHODE	RÉSULTATS
1737-1740	Bouguer	Fil à plomb et pendule	Douteux.
1774-1776	Maskeline et Hutton	Fil à plomb	4,5 à 5
1855	James et Clarke		5,316
1821	Carlini	Pendule en montagne	4,39 à 4,95
1880	Mendenhall		5,77
1854	Airy	Pendule souterrain	6,565
1883	Von Sterneck		5,77
1885	Von Sterneck		Environ 7
1797-1798	Cavendish	Balance de torsion	5,448
1837	Reich		5,49
1840-1841	Baily		5,674
1852	Reich		5,583
1870	Cornu et Baille	Balance ordinaire	5,56 à 5,50
1879-1880	Von Jolly		5,692
1878-1890	Poynting		5,493
1884	König, Richarz et Krigar Menzel		Non terminée.
1886-1888	Wilsing	Balance pendulaire	5,579
1889	Laska		Non terminée.

Je ne puis laisser passer l'occasion de rappeler ici l'extraordinaire prophétie de Newton, merveilleuse en ceci que, sans avoir fait aucune mesure directe, il arriva à un résultat plus voisin de la vérité que celui auquel sont parvenus plusieurs expérimentateurs :

Unde cum Terra communis suprema quasi duplo gravior sit quam acqua et paulo inferius in fodinis quasi triplo vel quadruplo aut etiam quintuplo gravior reperiatur; verisimile est quod copia materiæ totius in Terra quasi quintuplo vel sextuplo major sit quam si tota ea acqua constaret; præsertim cum Terram quasi quintuplo densiorem esse quam Jovem jam ante ostensum sit [1].

[1] *Newton's Principia*, 2e édition, 1714, p. 373.

III

L'appareil que je vais décrire a été combiné et construit de telle sorte que l'on pût indiquer, avec précision, la position de toutes les masses dont il se compose. On verra que j'ai montré dans cette construction une certaine hardiesse, quelques personnes diront même une véritable témérité; mais ayant confiance dans les principes que j'avais développés et dans les excellentes qualités du fil de quartz, je réduisis délibérément toutes les dimensions tellement que les forces à mesurer et plus encore les couples devinrent insignifiants, comparés à ceux auxquels on avait eu affaire jusqu'ici. Toute la difficulté des expériences de Cavendish, de Reich, de Baily consistaient dans la mesure d'une action aussi faible ; au lieu de l'augmenter, je la diminuai dans une forte proportion, heureux de pouvoir augmenter plus encore la précision des mesures. M. Cornu réduisit au quart l'appareil de Cavendish; je l'ai réduit au dix-huitième. Cavendish mesurait une force égale au poids de $\frac{1}{56}$ de milligramme, j'ai moins de $\frac{1}{75.000}$ de milligramme. A l'extrémité de son levier, Cavendish obtenait un couple de torsion égal à celui de $1^{mg},6$ à l'extrémité d'un fléau de 1 centimètre. J'observe, sur le même fléau, une force de $\frac{1}{80.000}$ de milligramme.

Ses forces étaient 1.400 fois supérieures aux miennes, ses couples étaient 120.000 fois plus grands.

L'un des principaux avantages d'un petit appareil, dans lequel le diamètre des sphères attirantes peut être considérable, comparé à la longueur du fléau, est un accroissement de sensibilité, l'angle de torsion étant augmenté pour la même durée d'oscillation. Cet avantage est particulièrement évident dans un appareil du genre de celui que je vais décrire, où les deux côtés sont à des niveaux différents. Mais on peut se demander si la réduction des dimensions n'a pas pour conséquence un manque de stabilité qui compense outre mesure les avantages dont je viens de parler.

On voit facilement qu'il n'en est rien. Les plus fortes perturbations susceptibles de fausser ces mesures sont dues aux différences infinitésimales de température en divers points de l'appareil; il en résulte des déplacements de l'air qui agissent sur ses parties mobiles. M. Poynting a montré que ces perturbations sont proportionnelles à la cinquième puissance des dimensions linéaires de l'appareil si les mouvements de l'air sont d'une lenteur suffisante pour être stationnaires ; elles s'élèvent même graduellement jusqu'à la huitième puissance à mesure que les termes proportionnels au carré de la vitesse deviennent de plus en plus grands, ce qui a lieu lorsque ces mouvements ne sont pas stationnaires. Aussi longtemps que l'appareil est assez petit pour qu'on puisse y négliger le carré de la vitesse, la stabilité est la même, quelles que soient ses dimensions; mais, dès qu'on dépasse cette limite, le désavantage d'une augmentation de grandeur se fait rapidement sentir. De plus, le temps nécessaire pour amener l'appareil à un état stationnaire augmente rapidement avec ses dimensions. Déjà avec mon petit appareil, il m'a paru nécessaire de laisser le tout en repos pendant 3 jours après que j'avais fait les mesures géométriques, pour lui permettre de reprendre une température uniforme.

La figure 1 montre la disposition de mon appareil. Une caisse en laiton BC, tournée avec précision, porte un couvercle L auquel on peut communiquer une rotation à l'aide des engrenages W. Les masses attirantes M sont suspendues, au moyen de fils de bronze phosphoreux, à des tubes verticaux P fixés au couvercle ; le tube central T contient l'équipage mobile. Un miroir N, suspendu à une armature à l'aide d'un fil de quartz, porte les deux petites masses m suspendues de même au niveau des centres des masses attirantes.

Le fond de l'appareil est couvert d'un épais matelas de caoutchouc I qui en préviendrait la destruction si les masses M venaient à tomber. Les quatre masses étant dans le même plan, aucun couple de torsion n'agit sur le fléau ; mais, si l'on vient à tourner le couvercle, l'attraction des masses M tendra à faire sortir les masses m de leur plan primitif, et le couple ira en croissant jusqu'à un certain point, passé lequel il décroît pour s'annuler après une rotation de 180 degrés.

L'action variant très peu autour de la position du maximum, qui dans mon appareil était distante de 65 degrés de la position de départ, il n'est pas nécessaire de mesurer cet angle avec une grande précision, si les expériences sont faites dans son voisinage.

Si les sphères d'or et les sphères de plomb ne tournent pas autour du même axe, ou si les centres des masses correspondantes ne sont pas exactement au même niveau, il n'en résulte que de faibles erreurs, le réglage parfait correspondant, dans tous les cas, à un maximum ou un minimum des actions réciproques ; sans entrer dans le détail, je puis dire que la vérification de tous les réglages peut être faite avec une exactitude dix fois supérieure à celle qui est nécessaire.

Le résultat final dépend d'un petit nombre de mesures qui peuvent être faites avec facilité et dans lesquelles il est aisé d'obtenir une grande

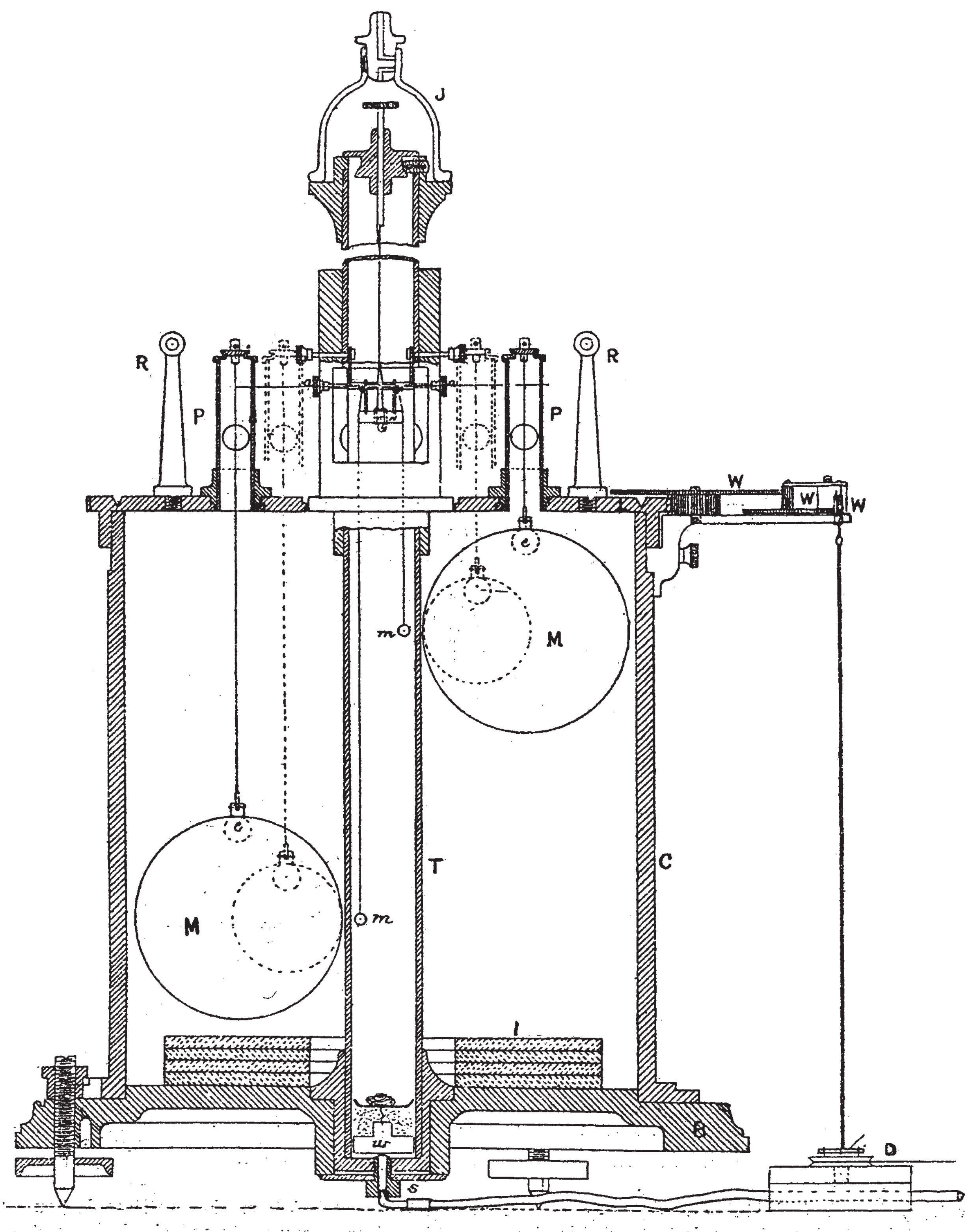

Fig. 1. — *Appareil pour déterminer la Constante de la gravitation.* — MM, masses attirantes suspendues, par l'intermédiaire des prisonniers *e*, à des fils de bronze; *mm*, masses attirées, suspendues, par des fils de quartz, au fléau; C, cage de l'instrument, reposant sur la base B, et formant support pour le couvercle; T, tube protecteur, fermé à la partie supérieure par une cloche J, et obstrué à la partie inférieure par un tampon d'ouate; le tube *s* débouchant en *w* sert à aspirer l'air pour provoquer l'oscillation du miroir; PP, tubes soutenant les masses attirantes; RR, colonnes fixées au couvercle pour permettre de le soulever; WWW, train d'engrenages donnant un mouvement de rotation au couvercle; ces engrenages sont commandés par la poulie D; I, feuilles de caoutchouc.

précision. Ces mesures sont celles des distances entre les fils qui soutiennent respectivement les sphères de plomb et les sphères d'or, la masse des premières, mais non celle des secondes, l'angle de déviation du fléau, enfin sa durée d'oscillation dans diverses circonstances bien définies.

Les figures 2, 3 et 4 représentent le souterrain dépendant du *Clarendon Laboratory* à Oxford, dans lequel mes appareils étaient installés, et que le Professeur Clifton avait très aimablement mis à ma disposition. L'instrument lui-même est disposé sur la table A_1 ; il est complètement enveloppé par une double caisse octogonale en bois dont l'intervalle des parois est rempli d'ouate. Deux écrans de feutre f_1 f_2 le séparent du reste du souterrain. Les instruments de commande et d'observation se trouvent sur une table A_2 ; ils se composent d'une grande lunette T pour la lecture des angles de déviation, d'une petite lunette t servant à lire la rotation du couvercle, et de deux poulies avec leurs cordes bb, au moyen desquelles on actionne respectivement ce dernier, et une petite lampe g que l'on déplace à volonté derrière une échelle transparente. Le train d'engrenages qui commande le mouvement du couvercle est actionné par la poulie D (fig. 1) qui reçoit son mouvement de la poulie d. Celle-ci possède un moment d'inertie considérable, et, comme la vitesse est fortement réduite, le mouvement du couvercle se fait sans à-coups. L'échelle S, dont l'image formée dans le miroir est observée au moyen de la lunette T, est divisée en cinquantième de pouce ($0^{mm},5$ environ). Deux poutres d'acier l_1, l_2, exactement nivelées, servent de banc pour mesurer la distance du miroir à l'échelle.

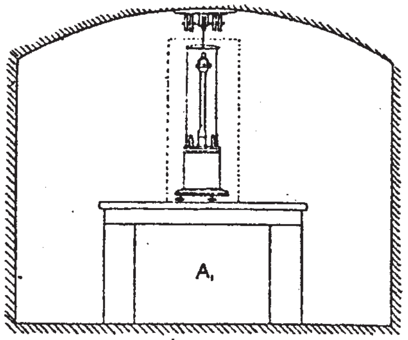

Fig. 2. — *Vue en bout du laboratoire.*

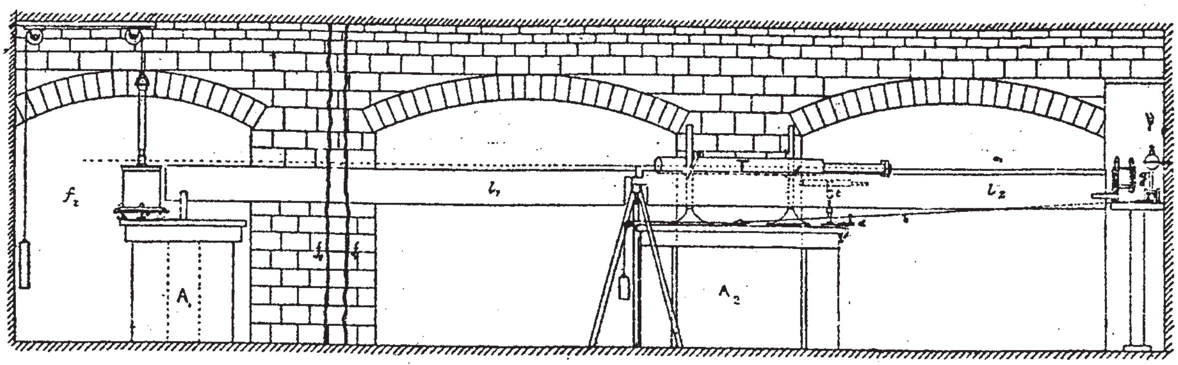

Fig. 3. — *Elévation du laboratoire.*

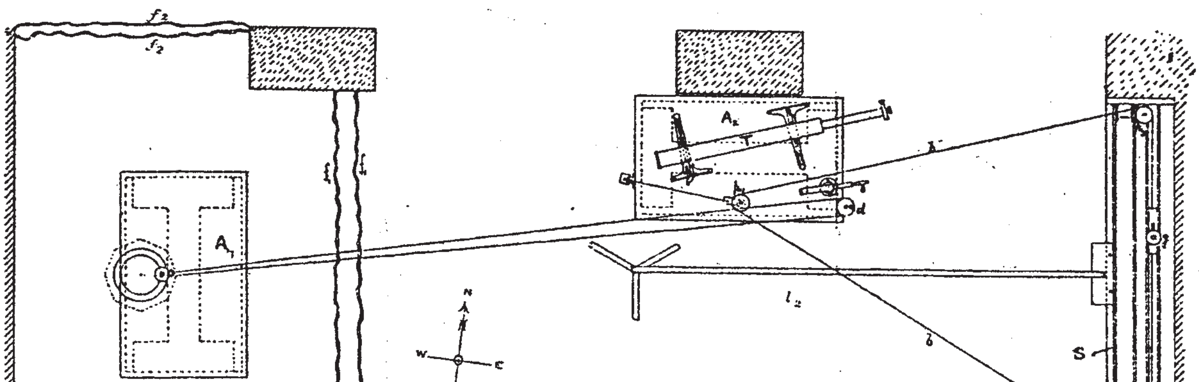

Fig. 4. — *Plan du laboratoire.*

A_1 et A_2, tables supportant l'appareil principal et les accessoires, lunettes, manettes de commande, etc.; T, lunette d'observation ; l_1, l_2, poutres servant à la mesure des distances ; g, petite lampe mobile le long de l'échelle S ; f_1, f_2, écrans de feutre isolant l'appareil de mesure ; bb, cordes de commande.

Un système de contrepoids fixés à des cordes sert à alléger le couvercle, de manière à diminuer les frottements; les cordes viennent s'attacher aux anneaux RR (fig. 1).

Les oscillations du miroir sont inscrites à l'aide d'un chronographe dont une des plumes est actionnée chaque seconde par une horloge astronomique.

IV

Je dirai maintenant quelques mots du procédé dont je me suis servi pour obtenir les sphères d'or et de plomb, de manière à être assuré de l'exactitude de leur forme et de leur parfaite homogénéité. Un habile artiste, M. Munro, a bien voulu me prêter son concours pour la construction de deux moules en fonte dure destinés aux sphères de plomb. Chacun de ces moules est formé de deux moitiés, et constitue une sphère creuse d'une perfection telle qu'un disque mince en acier introduit dans son intérieur bat légèrement lorsqu'il est seul, mais refuse d'entrer lorsqu'on le cale avec un papier à cigarette. La moitié formant couvercle est munie d'un plongeur en acier, remplissant exactement l'ouverture cylindrique, et continuant la surface de la sphère lorsque sa portée est appuyée sur l'extérieur du moule. A la partie inférieure, on a pratiqué une ouverture de 6 millimètres, dans laquelle une petite pièce de laiton s'ajuste exactement. Enfin, sur le côté se trouve un petit trou que l'on peut fermer à l'aide d'un bouchon de laiton.

Voici comment on procède pour la fabrication des sphères : le moule est d'abord enfumé, et vissé à fond ; il est ensuite chauffé jusqu'à la température de fusion du plomb. Le métal nécessaire, fondu dans un vase en terre, est écumé avec soin, et versé dans le moule de façon à remplir le goulot cylindrique. Le moule étant ensuite posé sur une plaque de fer, on réchauffe sa partie supérieure à l'aide d'un chalumeau pour que le refroidissement se produise de bas en haut. Aussitôt que le plomb commence à se figer dans le goulot, on introduit le plongeur, et on place le tout sous une presse hydraulique. Le plomb, déjà débarrassé des bulles que l'on rencontre souvent dans les métaux fondus, est fortement comprimé jusqu'à ce que l'excès s'échappe par le trou latéral sous la forme d'un fil. L'emploi d'un métal pur offre l'avantage d'éviter la liquation qui se produit toujours dans le refroidissement des alliages.

On obtient les petites sphères en fondant la quantité nécessaire d'or pur à peu près à la forme voulue, et en comprimant la masse entre deux plaques d'acier portant des empreintes hémisphériques. Les plaques dont je me suis servi ont été travaillées par M. Colebrook. J'ai pu ainsi obtenir, pour les masses attirantes et attirées, des corps géométriques présentant un degré d'homogénéité et de perfection de forme plus que suffisant pour les mesures que j'avais en vue. Les sphères d'or avaient respectivement les diamètres de 5 millimètres et $6^{mm},3$. J'ai fait aussi une paire de cylindres d'or, ayant $6^{mm},3$ de diamètre et de hauteur.

L'organe le plus important peut-être de tout l'appareil est le miroir servant de fléau représenté dans la figure 5. J'ai cherché à remplir aussi bien que possible, dans sa construction, un certain nombre de conditions qui, rigoureusement, s'excluent les unes les autres. Il doit être aussi léger

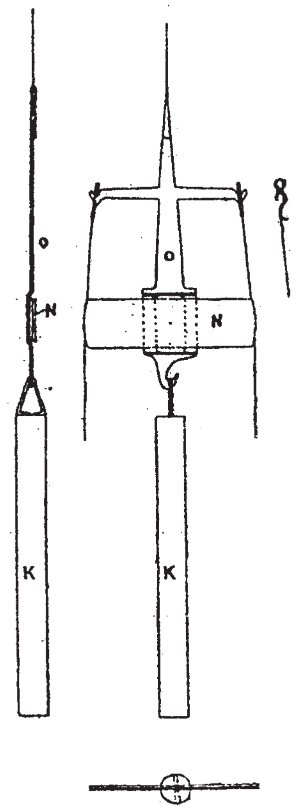

Fig. 5. — *Détail du fléau* O *et du miroir* N. — K, masse additionnelle destinée à la mesure du moment d'inertie de l'équipage.

que possible, posséder un moment d'inertie très faible ; la définition optique doit être parfaite, et sa forme doit être telle que l'action de la viscosité de l'air soit très réduite. Je l'ai découpé dans un excellent miroir circulaire, et ses qualités optiques dans le sens horizontal sont plus parfaites que celles du miroir entier. Une fois terminé, il a été fixé à un support en forme de croix en cuivre doré que représente la figure. On a pratiqué, à ses extrémités, deux traits verticaux de dimensions microscopiques, dans lesquels viennent se loger les fils de quartz supportant les sphères, et suspendus aux bras horizontaux. Le crochet central est destiné à recevoir un poids additionnel en forme de cylindre qui permet de déterminer le moment d'inertie de l'équipage. Il exerce, sur le fil central, une traction rigoureusement égale à celle des balles qu'il remplace, de façon à ne pas modifier le moment antagoniste.

L'expérience m'ayant montré qu'il pouvait être nécessaire de repêcher une des balles après la rupture du fil de quartz qui le supportait, je disposai, dans le fond du tube vertical, une capsule fixée à un fil de soie, à l'extrémité duquel j'avais attaché un très petit morceau de fer. Je reprenais celui-ci à l'aide d'un aimant et, le fil de soie une fois hors du tube, il m'était facile de ramener la sphère.

V

J'ai dit plus haut que les distances des fils de bronze et des fils de quartz supportant les quatre masses doivent être mesurées deux à deux avec la plus grande exactitude. J'ai construit, dans ce but, un comparateur composé de deux microscopes, que l'on peut mettre à la distance convenable; ils sont supportés par le même cadre qui reste en permanence dans la position où l'instrument doit servir. Les deux microscopes étant d'abord pointés sur les fils dont on veut mesurer la distance, le tout est ramené en arrière, et les fils sont remplacés au foyer des microscopes par une échelle divisée sur verre en centièmes de pouce; on n'a plus alors qu'à déterminer, à l'aide du micromètre, la position de chacun des fils par rapport aux deux divisions les plus voisines.

Il est nécessaire, dans ces mesures, d'isoler la cage, car le moindre courant d'air, susceptible d'exercer une force d'un dix-millième de milligramme sur les fils de quartz, rendrait toute mesure illusoire. Or, il ne faut pas compter pouvoir fermer la fenêtre à l'aide d'un verre travaillé optiquement, car le défaut de parallélisme de ses faces produirait sûrement un déplacement de l'image; mais j'ai heureusement trouvé qu'une lame de mica est rigoureusement parallèle et ne produit aucun déplacement.

Il est souvent nécessaire, pendant les expériences, d'agir directement sur les oscillations du miroir. Dans ce but, j'avais disposé au fond du tube central un petit tuyau aboutissant sur la table d'expérience. La fenêtre située derrière le miroir porte, dans une position excentrique, un tube rempli d'ouate. Une légère aspiration à l'extrémité du tuyau fait rentrer une très petite quantité d'air au voisinage du miroir, et le dévie de sa position. Le souffle est si faible qu'on peut, si on le désire, produire un mouvement correspondant à une seule division de l'échelle, soit à 6 ou 7 secondes d'arc, ce qui nécessite une force inférieure à un vingt-millionième de milligramme.

Une expérience complète nécessite 14 opérations distinctes; les huit premières comprennent le montage et l'ajustage de l'instrument, y compris le réglage fait en vue de la 9^{e} opération dans laquelle on emploie le compas optique. Cette dernière est fort importante, car le résultat final dépend directement de la mesure des distances horizontales; de plus, on profite de cette opération pour rendre identiques les plans des fils, et pour corriger toutes les excentricités. La figure 4 représente l'appareil portant le compas optique; après l'avoir retiré pour reporter les distances sur l'échelle en verre, on remet les fenêtres en place ainsi que les tubes protecteurs, on remonte la caisse de bois et on installe les écrans de feutre; l'appareil est ainsi prêt pour la 10^{e} opération dans laquelle on mesure les déviations et les périodes. Comme les variations de la température ont un effet considérable sur ces mesures, je laissais, chaque fois, l'appareil en repos pendant trois jours avant de commencer l'expérience; un repos de quelques heures aurait été absolument insuffisant.

L'opération 11 consiste dans la mesure des périodes avec le cylindre vertical remplaçant les sphères d'or; on détermine en même temps les déviations, toujours très faibles, produites par l'action des sphères de plomb et de la couronne dentée sur le miroir seul.

En général, les déviations mesurées dans une même série concordaient à $\frac{1}{10}$ de division près de mon échelle, ce qui correspond à 3/4 de seconde d'arc; or, le calcul de l'action d'un courant d'air, fondé sur la connaissance de la période, du moment d'inertie et du décrément logarithmique, montre que, si l'air faisait le tour entier du tube en six semaines, de manière à frôler les sphères d'or à la vitesse de 2 millimètres par jour, la déviation résultante aurait été du même ordre de grandeur.

On aurait pu craindre que les diverses pièces mobiles de l'appareil ne fussent susceptibles de prendre des mouvements indépendants; il en serait résulté une certaine erreur dans le calcul du résultat, déduit de l'hypothèse que l'appareil pouvait être traité comme un système rigide; par exemple, les sphères de plomb dévient les sphères d'or de la verticale passant par leurs points de suspension, de telle sorte que leur distance de l'axe diffère de celle qui a été mesurée; mais la déviation est au maximum de deux à trois millièmes de micron, et il n'y a pas lieu d'en tenir compte. Lorsque l'amplitude de l'oscillation atteint 100.000 divisions de mon échelle, la force centrifuge produit une déviation quatre fois plus grande, et j'ai pu me dispenser aussi de l'introduire dans les calculs. Pendant la période accélérée de l'oscillation, les sphères d'or restent légèrement en arrière, et la période se trouve ainsi modifiée; mais les constantes de l'appareil sont telles que les masses attirées se trouvent comme à l'extrémité d'un pendule ayant plus de 9 kilomètres de longueur. C'est le pendule équivalent, le plus court qui ait été employé dans les expériences de cette nature; et cependant je n'ai pas cru devoir appliquer une correction pour les quelques pouces des petits pendules additionnels.

Il est une correction que je n'ai pas pu négliger: elle provient de la mobilité de chacune des fibres auxquelles sont suspendues des sphères d'or, et en raison de laquelle ces dernières restent légèrement en retard sur le mouvement du miroir; j'ai eu recours, pour le calcul de cette correction, à l'obligeance du Professeur Greenhill qui, avec le concours du Professeur Minchin, a bien voulu aligner de nombreux logarithmes en vue de résoudre l'équation cubique du mouvement du pendule composé. La correction résultante est de $\frac{1}{7.830}$ du mouvement de torsion du fil de suspension.

Je mentionnerai encore les quatre corrections suivantes, aisées à calculer :

Perturbation due aux supports des sphères de plomb	$=\frac{1}{7.320}$
Perturbation due aux supports des sphères d'or	$=\frac{1}{265.000}$
Attraction des sphères de plomb sur les fils de quartz	$=\frac{+1}{200.000}$
Attraction des sphères d'or sur les fils de bronze	$=\frac{-1}{115.000}$

Pour pouvoir considérer les cylindres d'or comme des sphères, il faudra appliquer une correction de $\frac{1}{3.300}$, que M. Edser a bien voulu calculer.

VI

La tranquillité absolue est si importante dans les mesures, que j'ai toujours réservé les nuits du dimanche, de minuit à 6 ou 8 heures du matin, pour les observations de la déviation et de la période; toutes les autres mesures peuvent être faites dans la journée. Le dimanche est le seul jour où l'on puisse observer commodément, car les compagnies de chemins de fer emploient toutes les nuits à composer des trains à un mille environ du laboratoire, et il en résulte un tremblotement continuel qui fait perdre des heures de travail. Un train passant par hasard est moins nuisible; et, heureusement pour moi, la plupart de mes observations ont été faites pendant la grève des charbonnages, durant laquelle les trains étaient moins nombreux. Cependant, lorsque j'évite les perturbations dues aux trains ou au vent, je ne suis pas encore certain de pouvoir travailler. Par exemple, le 10 septembre 1893, à 3 h. 3/4 du matin, j'étais occupé à inscrire au chronographe les passages dans des mesures de durée; tout était parfaitement tranquille, et à ce moment particulier, les marques sur le tambour se succédaient à un intervalle d'environ 3 secondes. Subitement il se produisit un violent écart de 15 divisions ou 150 unités, bien supérieur à tout ce que les trains peuvent produire. Bien entendu, je dus interrompre tout le travail. La dernière inscription avait été faite à 15 h. 40 m. 14,3 s.; cette observation fut immédiatement portée dans mon carnet comme un tremblement de terre et je pus lire avec un certain plaisir, dans le *Standard* du mardi, qu'à un moment peu éloigné un séisme avait été observé en Roumanie. M. Ch. Davison m'informa que le choc a été inscrit à Bucharest à 15 h. 40 m. 35 s., mais l'épicentre était à une certaine distance de la ville. Bien que la vitesse de propagation du mouvement puisse paraître un peu élevée, il ne me semble pas douteux que la perturbation, dans mon appareil, ne soit due au tremblement de terre de Roumanie.

La viscosité de l'air, qui amortit les oscillations, est un obstacle aux observations de longue durée; j'ai donc pensé qu'il pouvait être intéressant de faire des mesures dans une atmosphère d'hydrogène. J'ai trouvé, en effet, que l'on pouvait tirer un réel avantage de ces observations; mais avec mon appareil, des difficultés de diverses natures rendaient cet avantage illusoire. J'indiquerai cependant comme un résultat intéressant que, dans les limites des erreurs d'expérience, les déviations et les durées corrigées de l'amortissement étaient les mêmes [1].

Il est intéressant de noter que l'élasticité de torsion du fil de quartz diminue lorsque l'on augmente la charge; ainsi, dans certaines expériences où les cylindres avaient été substitués aux sphères, le couple antagoniste était de 4 °/₀ plus faible; il ne peut y avoir aucun doute sur ce résultat, car la valeur de G, déduite de ces expériences, est pratiquement égale aux autres.

Dans les diverses séries d'expériences que j'ai faites, les sphères de plomb furent retournées et changées de toutes les manières possibles de façon à éliminer tous les défauts possibles de symétrie; ainsi la sphère supérieure fut placée à la partie inférieure, toutes deux furent tournées de 180 degrés autour d'un axe vertical, leur distance

[1] Les mesures dans une atmosphère d'hydrogène m'ont conduit à une observation que je crois nouvelle: le miroir de l'appareil, argenté et verni d'un côté, se courba légèrement dans l'hydrogène de façon à présenter sa convexité du côté où le verre était nu, et reprit sa forme primitive dès qu'il fut de nouveau entouré d'air.

fut réduite de $0^{mm},3$; le résultat resta constant à $\frac{1}{2.400}$ près. Après la huitième série, les balles d'or furent remplacées par des cylindres plus lourds, mais le nombre trouvé resta identique au précédent à $\frac{1}{3.700}$ près. Je cassai alors une extrémité, puis l'autre du fil de quartz ; je le remis en place et, après avoir répété toutes les déterminations, je retrouvai le résultat de la 8ᵉ expérience à $\frac{1}{60.000}$ près.

Les expériences 7, 8, 9 et 10 ont été faites dans des circonstances particulièrement favorables, et je les considère comme les meilleures. La dernière a été faite dans de mauvaises conditions ; pressé par le temps, je fus obligé de précipiter trop les opérations, et les mesures de déviation furent faites avant que l'équilibre de température ait été obtenu.

Tableau II. — Mesure de G par l'auteur.

Nᵒˢ de la série	DATES	SPHÈRES DE PLOMB			MASSES D'OR		RÉSULTATS	
		Voûte	Mur	Marques	Voûte	Mur	G. (en dynes)	Densité de la Terre
3	1892, 1-30 oct. . . .	2 bas	1 haut	Intérieure	1,3 gramme 4 bas	3 haut	$66,645 \times 10^{-9}$	5,5213
4	1893, 15 août-3 sept.	2 bas	1 haut	—	2,6 grammes 4 bas	3 haut	66,702	5,5167
5	— 4-11 sept. . .	1 haut	2 bas	—	3 haut	4 bas	66,711	5,5159
6	— 12-14 — . .	2 bas	1 haut	—	4 bas	3 haut	66,675	5,5189
7	— 15 — . .	2 bas	1 haut	Extérieure	»	»	66,551	5,5291
8	— 16-18 — . .	1 bas	2 haut	Intérieure	»	»	66,579	5,5268
9	— 27 sept.-3 oct.	1 bas	2 haut	—	cylindres 3 bas	1 haut	66,533	5,5306
10	1894, 1-13 janv. . .	1 bas	2 haut	—	4 bas	3 haut	66,578	5,5269
11	— 14 — . .	2 bas	2 haut	—	4 bas	3 haut	dans l'hydrogène	
12	— 17-21 — . .	2 haut	1 bas	—	3 haut	4 bas	66,695	5,5172
					RÉSULTATS ADMIS . .		$66,576 \times 10^{-9}$	5,5270

Les résultats de mes mesures sont sommairement indiqués dans le tableau II.

L'ensemble du travail m'a conduit à la conclusion suivante :

Deux sphères de 1 gramme ayant leurs centres à 1 centimètre de distance s'attirent avec une force de **66,576 × 10⁻⁹ dynes,** *et la densité moyenne de la Terre est* 5,5270 *fois plus grande que celle de l'eau.*

Je dirai encore que, malgré tous les soins que j'ai apportés à ce travail, je n'en suis pas absolument satisfait ; pendant les cinq dernières années, j'ai poursuivi sans relâche ces recherches avec l'espoir de les mener à bien, sachant que, grâce aux admirables propriétés du fil de quartz, et avec l'appareil que j'avais construit, il devenait pour la première fois possible de déterminer la Constante de la gravitation avec une précision égale à celle que l'on obtient dans les mesures électriques et magnétiques. J'espère pouvoir reprendre un jour ce travail, mais les conditions dans lesquelles j'opère sont trop difficiles ; je ne puis pas faire de longues séries d'expériences en un endroit éloigné de toutes les causes de dérangement des appareils ; je ne puis échapper à cette obligation perpétuelle de rentrer à mon travail à Londres ; je devrai ainsi l'abandonner, avec la certitude que des progrès nouveaux seront obtenus par mes procédés, mais qu'ils seront atteints par un physicien plus favorisé que moi.

C. V. Boys,
Membre de la Société Royale de Londres,
Professeur de Physique
à l'Ecole des Mines de South-Kensington.