

Construction d'une balance de Cavendish

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

Résumé : Dans les deux cahiers précédents nous avons parlé des expériences fondamentales de Cavendish et de Boys qui ont permis de mesurer la constante de la gravitation universelle. Cette expérience est si délicate qu'il paraît impossible de la réaliser avec des moyens simples. C'est pourtant le défi que j'ai essayé de relever. Je voudrais vous faire partager le plaisir de cette réalisation. J'espère vous donner envie de vous lancer à votre tour dans cette expérience.

Mots-clefs : REALISATION - GRAVITATION

Introduction

Il y a bien longtemps que je rêvais de monter l'expérience de Cavendish mais sans oser m'y attaquer. Lors du repas de l'Assemblée Générale du CLEA de 2002, en discutant avec mes voisins de table (A. Petit et B. Sandré) j'appris que l'expérience avait été réalisée pour un TP à Orsay. Je décidais donc de me jeter à l'eau mais en réalisant tout moi-même avec du matériel facile à se procurer. En effet, dans l'expérience d'Orsay, la partie essentielle (la balance proprement dite) était fournie toute faite.

Avant même de consacrer trop de temps à la réalisation, je voulus essayer de mettre en évidence la force d'attraction. Je réalisai une sorte de balance, supportant une petite sphère de plomb, montée sur une pointe sans frottement et j'approchai une grosse masse (batterie de voiture). Aucune attraction ne fut décelée. J'essayai également de monter la sphère de plomb sur un petit flotteur et j'approchai la masse attractive, sans plus de succès. Je décidai néanmoins d'attaquer une réalisation plus soignée mais en me promettant de ne pas trop fignoler quand même. Le succès fut au bout de la réalisation, mais non sans quelques difficultés comme je vais vous le

décrire. Pour le principe de l'expérience je vous invite à vous reporter aux CC102 et CC103.

Le matériel

La première chose à faire est de rassembler le matériel et principalement le plomb. En parlant de mon projet à quelques collègues et amis je reçus bientôt plus de plomb qu'il n'était nécessaire (6 ou 7 kilogrammes), sous la forme de vieux tuyaux. Je récupérai un tube en aluminium, d'un mètre de long et d'environ 25 millimètres de diamètre (ancien velux), mon épouse me procura un rouleau de papier aluminium de cuisine de 10 microns d'épaisseur (c'est marqué sur la boîte) pour la réalisation du ruban de suspension de la balance. Pour le reste, un peu de bois, quelques chutes de tôle d'aluminium, deux boîtiers de CD. Enfin, il faut récupérer un petit miroir (on pourrait prendre un petit morceau d'un CD) et un pointeur laser.

Nous pouvons commencer la réalisation, mais avant, je vous montre une photo de la balance terminée (figure1).

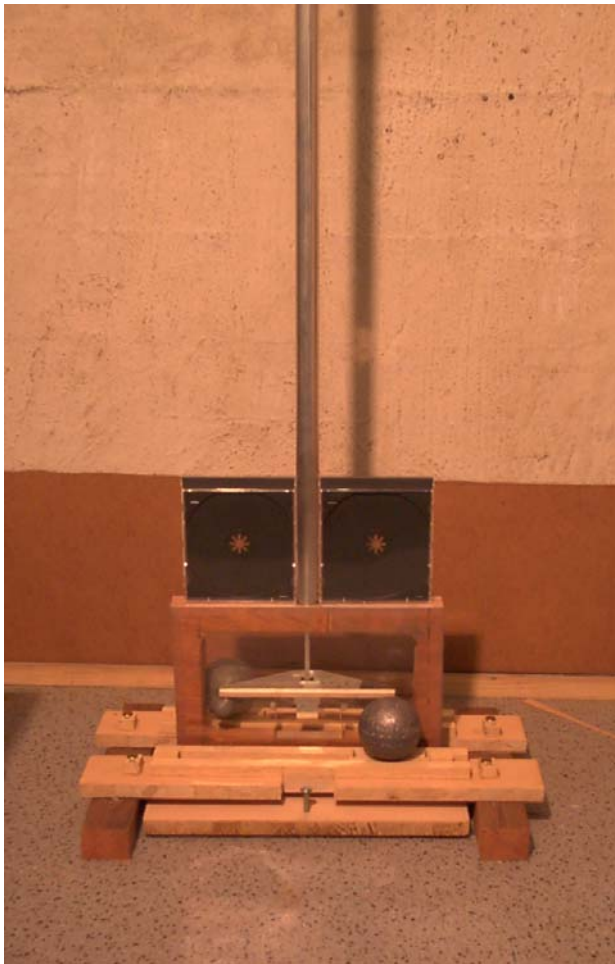


Figure 1: La balance de Cavendish terminée.

Je ne prétends pas que la réalisation est la plus commode et vous pourrez faire mieux sans doute. Mais au moins vous savez qu'en respectant les caractéristiques essentielles le résultat sera correct. Nous allons décrire tout d'abord la réalisation des sphères de plomb. C'est de loin la partie la plus délicate.

Réalisation des sphères de plomb

J'ai commencé par la fabrication des petites sphères. J'avais une bille d'acier de 2,5cm de diamètre. C'est elle qui m'a servi de modèle. J'ai utilisée la méthode classique des fondeurs, avec du sable spécial de moulage et un châssis en bois de ma confection. Je ne vais pas décrire la méthode car ce n'est pas celle que je vous recommande. La technique qui m'a permis de faire les grosses

sphères me paraît bien plus facile à mettre en œuvre.

Technique de moulage au plâtre

Les sphères modèles sont constituées d'une bille de 2,5cm de diamètre, en acier, pour les petites sphères et une boule en polystyrène de 7cm de diamètre pour les grosses sphères.

On commence par badigeonner la sphère modèle avec du savon noir à l'aide d'un pinceau. Puis on remplit de plâtre un pot en plastique (fromage blanc) jusqu'au quart de sa hauteur. Pour mémoire pour gâcher le plâtre il faut verser le plâtre dans l'eau, et non le contraire. Quand le plâtre est dur, on pose le modèle de sphère sur ce socle encore frais. On complète avec du plâtre un peu liquide jusqu'au milieu de la sphère modèle (on aura pris soin de tracer le cercle équatorial avant l'opération). On attend alors que le plâtre soit bien dur. On démoule le bloc qui constitue la première partie du moule. On vérifie que la sphère modèle se décolle facilement. Avec un couteau on fait trois encoches en V sur les bords du moule. Ces encoches serviront de détrompeur pour que les deux parties du moule soient toujours placées exactement dans la même position.

On remet ensuite le bloc de plâtre et le modèle dans le pot en plastique. On badigeonne la surface et les encoches avec du savon (on peut sans inconvénient remettre une couche de savon sur la demie sphère apparente). On remplit ensuite complètement le pot avec une nouvelle coulée de plâtre. On a ainsi constitué la deuxième partie du moule. Quand le plâtre est bien dur et bien sec, on ouvre les deux parties du moule, on enlève la sphère modèle. Le moule définitif est presque terminé. Il ne reste qu'à tailler au couteau deux demies cheminées coniques de coulage sur chacun des deux blocs du moule, de telle manière que, une fois le moule refermé, les deux demies cheminées constituent une unique cheminée conique. Cette cheminée ne doit pas être trop étroite (8 à 10 mm de diamètre) pour que l'air puisse sortir du moule pendant la coulée du plomb. Pour le moule original que j'ai réalisé pour les grosses sphères j'avais fait une cheminée cylindrique dans le bloc supérieur comme on peut le voir sur la figure 3. Ceci rendait le démoulage difficile à cause du cône de plomb qui restait dans la cheminée. Il est préférable de faire une cheminée conique entre les

deux parties du moule, comme celle qu'on voit sur la figure 3, pour le petit moule. Ainsi, le démoulage ne pose aucun problème.



Figure 3: Les moules en plâtre.

Il nous reste à effectuer l'opération la plus difficile, le coulage du plomb. Il y a quelques précautions à prendre, car plusieurs dangers existent.

Coulée du plomb fondu

Les grosses sphères de 7cm de diamètre ont une masse de 2kg. Fondre une telle masse réclame une parfaite organisation et une grande vigilance. Il est conseillé de faire l'opération, dehors, à même le sol. Le métal est fondu au chalumeau à butane dans une casserole de fer en tôle épaisse. La casserole était entourée de briques réfractaires et, détail important, je me plaçais de telle sorte que le vent éloigne de moi les vapeurs. En effet, au-dessus de 327 degrés, avant même l'ébullition, le plomb donne des vapeurs nocives qu'il faut éviter de respirer.

Le coulage proprement dit ne pose pas de problème. Les deux parties du moule étant fermement maintenues ensemble par un serre-joint (ou un fil de fer) et le tout étant solidement fixé au sol, on saisit le manche de la casserole avec des maniques de cuisine et on coule doucement le métal dans la cheminée. On écarte éventuellement les scories de surfaces avec une tige métallique. On laisse refroidir longuement et on démoule. Si tout s'est bien passé on obtient une belle sphère. On coupe à la scie le moulage de la cheminée en plomb. On façonne ensuite la sphère, à la lime ou au marteau. Le moule est prêt à resservir pour une autre sphère. Les Figures 4 et 5 présentent le matériel utilisé. Quand vous aurez terminé cette

opération le plus difficile sera fait. La suite ne pose pas de problème majeur à une personne quelque peu méticuleuse.



Figure 4: Le matériel de moulage.



Figure 5: Gros plan sur la casserole.

La balance

Le ruban de suspension¹

Si vous avez lu les articles précédents vous avez compris qu'il y a intérêt, comme l'a montré Boys, à réaliser une balance minuscule pour pouvoir utiliser un fil de suspension extrêmement fin. Le couple de rappel variant comme la puissance quatrième du diamètre du fil, plus le fil est fin, plus grande est la déviation de la balance de torsion lors de l'attraction mutuelle des petites et des grosses sphères. Le problème est qu'il n'est pas facile de manipuler des fils de quelques microns de diamètre. D'où l'idée d'utiliser un ruban de suspension, offrant une bonne résistance à la rupture mais une faible résistance à la torsion. J'eus l'idée d'utiliser du vulgaire aluminium de cuisine dont l'épaisseur est d'environ 10 microns. Un rapide calcul montre qu'une largeur de 5mm

¹ Dans la dernière réalisation, le ruban d'aluminium a été remplacé par un ruban de cassette ordinaire ou de DAT.

doit supporter les 200g de la balance (chaque petite sphère a une masse de 100g).

Pour découper le ruban de un mètre de long et de 5 mm de largeur j'ai fabriqué un "découpoir" fait de deux lames de rasoir, séparées par une baguette de section carrée de 5mm de côté et collées en biais à la colle cyanocrylate (voir la Figure 6).



Figure 6: Le "découpoir" à ruban.

Pour commencer la découpe on engage sous les deux lames une large bande d'aluminium d'une dizaine de centimètres de largeur. Pour faciliter le démarrage, on peut coller une languette plastique de 3mm de largeur sur le bout de la bande. On engage la languette sous les lames et ensuite il suffit de tirer très doucement et sans à-coups, pour obtenir un beau ruban de 5mm de largeur.

Nous discuterons dans le prochain article les avantages et les inconvénients d'un tel ruban de suspension. J'ai depuis imaginé d'utiliser une bande magnétique d'une cassette. Je ne sais pas si cela donnerait de bon résultat. Si oui ce serait infiniment plus facile à réaliser que le ruban d'aluminium. Mais ce que je peux dire c'est que le ruban d'aluminium fonctionne bien. Vous voyez qu'il y a encore de la place pour l'expérimentation.

Le boîtier

Le boîtier a été réalisé dans une planche épaisse (3,5cm) dont le centre a été évidé. Un trou circulaire a été pratiqué sur le dessus pour recevoir le tube d'aluminium qui abrite le ruban de suspension. Deux boîtiers de CD ont été collés à l'Araldite de part et d'autre du tube pour servir d'équerres perdues. Ce boîtier a été collé sur une planche reposant sur trois boulons en triangle qui permettent de régler la verticalité du tube.

Un "U" en tôle d'aluminium permet d'immobiliser le fléau, lors des transports, en abaissant le point supérieur de fixation du ruban.

Le fléau

Le fléau est découpé dans une tôle d'aluminium selon le dessin de la Figure 7 et rigidifié par deux baguettes en bois de balsa. Les petites sphères de plomb sont collées à la colle cyanocrylate sur les pattes des extrémités du fléau. Un petit miroir est collé sur la languette située au milieu, sous le fléau. Une fente permet de fixer le ruban de suspension. Le bord tranchant supérieur de cette fente a été protégé par un petit tube de laiton fendu.

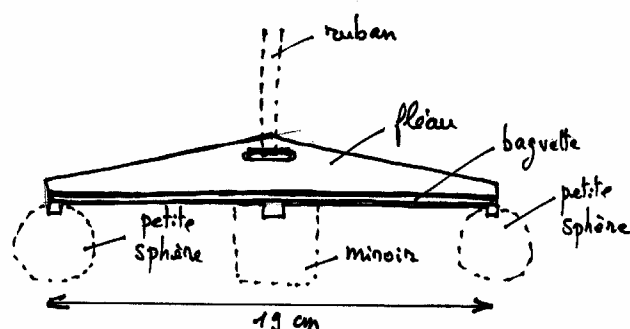


Figure 7: description du fléau.

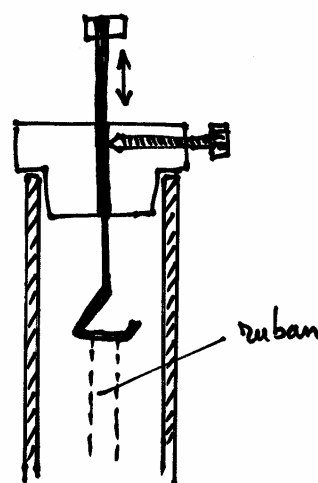


Figure 8: Le système de suspension du ruban, au sommet du tube. En débloquent la tige de suspension on peut abaisser le fléau pour qu'il repose sur un support.

Mise en place du fléau

Le ruban de suspension est fixé sur son système d'accrochage (Figure 8) et glissé dans le tube d'aluminium. Le fléau repose sur le support en "U". On glisse l'extrémité libre du ruban dans la fente du fléau et on la fait remonter sur une hauteur de quelques centimètres. On colle alors le ruban sur lui-même avec une goutte de colle cyanocrylate. Quand la colle est sèche il suffit de relever délicatement le point de suspension du ruban et de l'immobiliser pour que la balance soit en position. On ferme enfin le boîtier par deux feuilles transparentes pour éviter les courants d'air (dans la prochaine version j'utiliserai des vitres de verre).

Les réglages

On place la balance dans un local isolé, avec un sol bien rigide (dalle en béton) et on règle la verticalité du tube pour que le ruban soit bien libre. Ensuite, en jouant sur le point de suspension du ruban, on règle l'orientation du fléau pour le placer parallèlement aux faces transparentes du boîtier. Cette opération est très longue. Il faudra sans doute plusieurs jours pour obtenir un réglage parfait.

Vous mettez à profit les longues attentes nécessitées par les réglages pour monter les glissières de bois sur lesquelles les grosses sphères vont se déplacer. Avec quelques baguettes et quelques chutes de bois le travail n'est pas difficile. Il faut simplement veiller à ce que ces glissières n'aient aucun contact avec la balance. J'ai collé les baguettes directement sur le sol avec de la colle thermofusible. Les grosses sphères sont collées avec cette même colle sur les parties mobiles des glissières. Quand on fait passer une grosse sphère d'un côté à l'autre, elle doit passer très près du boîtier (quelques millimètres) sans jamais le toucher.

Il reste aussi à mettre en place le pointeur laser. Je l'ai fixé sur un bâti de bois collé à même le sol. Le faisceau laser est dirigé sur le petit miroir du fléau. Il s'y réfléchit et va former un spot à l'autre bout de la pièce sur un petit écran (feuille de papier millimétrée collée en face de la balance). Attention de ne pas recevoir le faisceau dans l'œil.

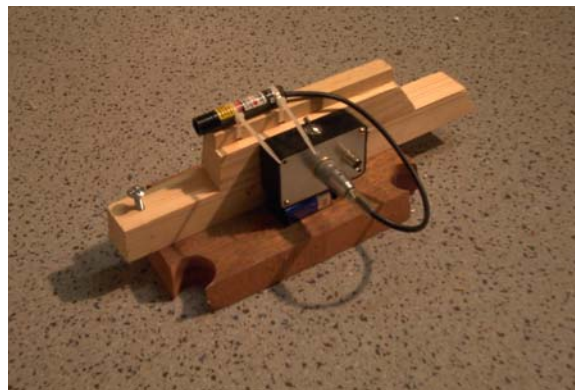


Figure 9: Le pointeur laser collé sur le sol.

Premiers essais

C'est avec une certaine émotion qu'on effectue le premier essai. Il faut beaucoup de calme mais le résultat est spectaculaire.

Il faut laisser la balance se reposer de nombreuses heures, les grosses sphères étant placées par exemple l'une devant la petite sphère de droite et l'autre derrière la petite sphère de gauche. Le mieux est d'attendre toute une nuit. Vous arrivez alors le lendemain, sur la pointe des pieds, vous allumez le laser et notez la position du spot sur le papier millimétré. Si vous n'avez pas perturbé le système par des déplacements violents, le spot doit être immobile. Vous allez calmement faire glisser les grosses sphères pour les amener en face des petites sphères opposées (sans toucher la balance) et vous revenez surveiller le spot, à pas de loup. Lentement vous le verrez se déplacer (le déplacement est visible après quelques secondes). Vérifiez que le déplacement est bien dans la direction que laissait prévoir la géométrie du système. Le spot se déplacera de plusieurs centimètres et oscillera ainsi jusqu'à trouver une nouvelle position d'équilibre, après plusieurs heures. Vous pourrez répéter l'opération en inversant à nouveau les grosses sphères. Par plaisir j'ai du faire l'expérience une trentaine de fois. Chaque visiteur avait droit à un passage par ma cave pour voir l'expérience. La gravitation n'a jamais été prise en défaut.

Il reste à envisager maintenant la mesure de la constante de la gravitation universelle G . C'est ce que nous verrons dans le prochain article.

REALISATION

Mesure de G avec la balance de Cavendish

Paturel G., Observatoire de Lyon

Résumé : Dans le précédent Cahier Clairaut (CC104) nous avons décrit la construction d'une balance de Cavendish. Historiquement conçue pour déterminer la densité moyenne de la Terre, la balance de Cavendish est désormais utilisée pour mesurer la constante G de la gravitation universelle. Dans le présent article nous montrons comment déduire cette constante. Compte tenu de la difficulté extraordinaire de cette expérience et des caractéristiques de notre balance nous ne pourrions pas utiliser la méthode traditionnelle. Une autre méthode est expliquée qui donne un résultat acceptable.

Mots-clefs : REALISATION - GRAVITATION - MESURE

Introduction

Nous donnons à nouveau la photo de notre balance (figure1). Le ruban de suspension du fléau passe dans le tube vertical. Les extrémités du fléau supportent chacune une petite sphère en plomb de 2,5 cm de diamètre. Sous le fléau, un petit miroir réfléchit un rayon laser (éteint sur la photo). Ce système, dit de Poggendorf, permet de mesurer la rotation de l'équipage par la mesure du déplacement du spot réfléchi. Les grosses sphères attractives en plomb de 7 cm, de diamètre, sont montées sur des rails en bois, complètement indépendants du boîtier de la balance. Quand l'équilibre est modifié par le déplacement des grosses sphères, le spot lumineux du faisceau laser se déplace et permet de suivre la rotation de la balance, donc le déplacement des petites sphères, avec une extrême précision.

Avant l'assemblage de la balance, nous avons déterminé avec autant de précision que possible les caractéristiques des éléments: masse des sphères et longueur du fléau. Une fois en position, nous avons déterminé les autres caractéristiques que nous récapitulons.

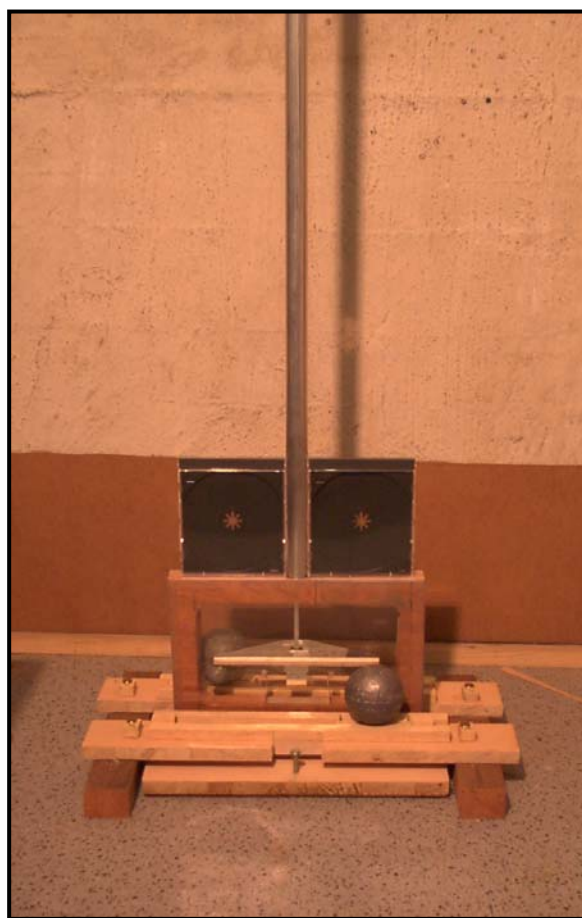


Figure 1: La balance de Cavendish terminée

Les caractéristiques

La pesée des sphères se fait avec une petite balance de cuisine. Les petites sphères de $2,5\text{ cm}$ de diamètre pèsent $m = 93\text{ g}$ chacune. Les grosses sphères de 7 cm de diamètre pèsent $M_1 = 2080\text{ g}$ et $M_2 = 2010\text{ g}$, respectivement. Nous adopterons pour les deux une valeur moyenne $M = 2045\text{ g}$. La longueur du fléau, ou plus exactement, la distance entre les centres des petites sphères collées sous le fléau est de $2.b = 19\text{ cm}$.

La première caractéristique à mesurer est la période d'oscillation, T , de la balance. En effet, la sensibilité de la balance augmente comme le carré de la période. Dans la méthode traditionnelle, la période permet indirectement de déterminer les caractéristiques mécaniques, C , du ruban de suspension. Une mesure patiente du temps que met le spot lumineux pour faire un grand nombre d'aller et retour fournit la période avec une bonne précision. J'ai trouvé: $T = 148,3\text{ s}$. Quand j'ai obtenu cette valeur, j'ai compris que l'attraction universelle serait visible. C'était en effet approximativement la période de la balance de Boys.

J'ai déterminé ensuite la distance minimale, d , entre les centres d'une grosse sphère et d'une petite. Pour cela, j'ai simplement mesuré la distance D entre les rails supportant les grosses sphères. La figure 2 montre que l'on peut déduire très facilement $d = D/2$. J'ai mesuré $D = 11,5\text{ cm}$. La valeur est donc $d = 5.75\text{ cm}$. Cette distance varie au cours de la mesure, mais cette variation est négligeable compte tenu de la précision espérée.

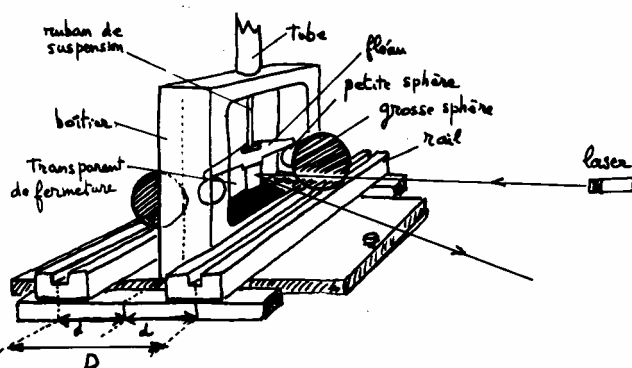


Figure 2 : Schéma montrant comment déterminer la distance entre le centre d'une grosse sphère et celui d'une petite sphère $d = D/2$.

La distance L , entre le centre du miroir et l'écran de projection, a été soigneusement mesurée avec un mètre à ruban. Le résultat obtenu est: $L = 4910\text{ mm}$. Plus cette distance est grande, plus précise sera la mesure de la rotation du fléau. On peut calculer qu'une rotation d'un degré donnerait à cette distance un déplacement du spot lumineux de 17 cm , car il ne faut pas oublier que par réflexion sur le miroir le faisceau tourne d'un angle double.

Nous négligeons la masse du petit miroir et celle du fléau. Ces masses interviennent normalement dans l'expression du moment d'inertie de la balance. En les négligeant, l'expression du moment d'inertie se simplifie et sa mesure explicite n'est pas nécessaire. Il entre implicitement dans l'expression de la période que l'on a mesurée.

Première mesure

En procédant comme je l'avais décrit à la fin du dernier article, on peut mesurer le déplacement du spot lumineux. Il faut être très patient. On laisse la balance se stabiliser, une nuit au moins. On note la position du spot. On déplace les grosses sphères. On laisse stabiliser à nouveau pendant plusieurs heures. On note la nouvelle position du spot. En opérant ainsi, le déplacement mesuré était de l'ordre de $\Delta y = 18\text{ mm}$. Faisons le calcul de la constante de la gravitation G ("big dji" en anglais):

Soit α l'angle total de rotation, pour les positions extrêmes des grosses sphères. Le couple de rappel est $C\alpha$, où C est une constante caractérisant le ruban de suspension. Appelons f la force d'attraction entre une grosse sphère et une petite. Le couple de cette force par rapport à l'axe de rotation du fléau est $f.b$. Comme il y a deux paires de sphères agissant dans un sens puis dans un sens opposé, le couple total est $4f.b$. La force f s'exprime par la loi de gravitation universelle:

$$f = GMm/d^2.$$

Ecrivons qu'il y a équilibre des couples quand la balance est stabilisée:

$$C\alpha = 4.G.M.m.b/d^2 \quad (1).$$

D'autre part, la période d'oscillation de la balance de torsion s'exprime par la relation:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{C}},$$

où J est le moment d'inertie du fléau. Nous l'écrivons simplement, en vertu des simplifications vues plus haut: $J=2mb^2$.

Ainsi, la constante mécanique caractérisant le ruban s'exprime par:

$$C=8\pi^2mb^2/T^2.$$

En reportant cette expression dans la relation (1), il vient finalement:

$$G = \frac{2\pi^2\alpha.b.d^2}{MT^2} \quad (2).$$

Faisons de suite l'application numérique. L'angle α en radian s'exprime simplement par:

$$\alpha=\Delta y/(2L),$$

le facteur 2 prend en compte le fait que le faisceau dévie d'un angle double de celui du fléau, à cause de la réflexion sur le miroir.

Avec les valeurs mesurées, nous obtenons $\alpha=0.00184 \text{ rd}$ (c'est à dire $0,10^\circ$). En reportant cette valeur ainsi que les autres valeurs numériques dans l'expression (2), on aboutit à la valeur un peu décevante $G = 25 \cdot 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$ (la valeur admise est $6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$).

Analyse des erreurs

En analysant bien les mesures, j'ai acquis la conviction que la seule source d'erreur possible provenait du ruban de suspension qui doit présenter de l'hystérésis. Quand le ruban est tordu sous l'effet de la rotation de la balance, il garde la mémoire de cette torsion. Bref, le ruban de suspension en aluminium manque de ressort. Une première façon d'éviter cet effet est de déplacer les grosses sphères très lentement, pour parvenir au second point d'équilibre, de manière asymptotique, sans jamais le dépasser. En répétant l'expérience, je n'ai pas, malgré toute ma patience, pu éviter les oscillations, mais l'amplitude a été sérieusement diminuée. La valeur de Δy a été réduite ainsi d'un facteur deux, et la valeur de G a été réduite d'autant, soit:

$$G=12,5 \cdot 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2.$$

On peut imaginer qu'en permutant les grosses sphères avec une infinie lenteur, on arriverait à une valeur de G plus acceptable. J'ai modifié la balance en remplaçant le ruban de suspension en aluminium par un morceau de bande magnétique d'une cassette "audio". Le résultat a été sensiblement meilleur. Cela montre que l'on peut éviter la difficile réalisation du ruban d'aluminium.

Au lieu de continuer dans cette voie classique, j'ai imaginé une méthode très différente, que je vous livre maintenant.

Méthode dynamique

Au tout début de l'attraction, quand on vient juste de faire glisser une grosse sphère en face d'une petite, le ruban n'offre pas de résistance à la torsion. La petite sphère "tombe" librement sur la grosse. Si nous parvenions à mesurer l'accélération de cette "chute", nous pourrions en déduire G . L'accélération s'écrit :

$$a = \frac{GM}{d^2} \quad (3).$$

Comment mesurer a ? Il faut enregistrer simultanément le déplacement (de la petite sphère, donc du spot) et le temps. Pour parvenir à cela, j'ai collé une montre digitale sur le papier millimétré où se formait le spot lumineux. La montre est mise en mode chronomètre. On attend le repos parfait du spot et on démarre le chronomètre au moment précis où les grosses sphères sont déplacées. J'ai réalisé une série de photos du spot et de la montre, comme illustré à la Figure 3.



Figure 3 : Les photos successives montrant le spot et le chronomètre. On peut mesurer ainsi l'accélération produite par une sphère attractive.

J'ai mesuré le déplacement y par rapport à une origine arbitraire. Le temps est noté au dixième de seconde. On trouve, à partir des cinq premières photos, le temps t et la position y du spot (cf. tableau 1):

temps t (s)	y (mm)	x (mm)	$(x-x_0)$ (mm)	$(t-t_0)^2$ (s ²)
10,8	3,00	0,029	0	0
25,2	3,5	0,034	0,005	204
37,3	5,5	0,053	0,024	697
45,3	8,0	0,077	0,048	1183
52,9	11,0	0,107	0,077	1764
64,3	16,5	0,159	0,130	2851

Tableau 1: mesure de temps t et de déplacement du spot y pour déduire l'accélération (voir texte).

Le déplacement y du spot est converti en déplacement x des petites sphères par la relation géométrique. Comme précédemment le facteur 2 prend en compte le fait que la réflexion du faisceau lumineux donne une déviation double:

$$x = \frac{1}{2} \frac{b}{L} y$$

L'accélération est normalement donnée par la relation classique de la dynamique:

$$(x - x_0) = \frac{1}{2} a' (t - t_0)^2.$$

Mais attention, comme les grosses sphères agissent dans un sens puis dans l'autre, ce que nous déterminons est le double de l'accélération cherchée $a = a'/2$. En revanche, le fait qu'il y ait deux petites sphères ne change rien, car chacune acquiert la même accélération.

Les quantités nécessaires sont données dans le Tableau 1. La représentation graphique (Figure 4) de $a = a'/2$ montre que l'accélération est à peu près constante pendant les premières secondes.

On déduit de ces mesures que l'accélération est $a = 130 \times 10^{-6} / 3000 \text{ m.s}^{-2}$, soit:

$$a = 4,33 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-2}.$$

Il ne nous reste plus qu'à déduire $G = a \cdot d^2 / M$. Avec $d = 0,0575 \text{ m}$ et $M = 2,045 \text{ kg}$ on aboutit à la valeur:

$$G = 7,0 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2} \cdot \text{m}^2,$$

au lieu de $6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2} \cdot \text{m}^2$.

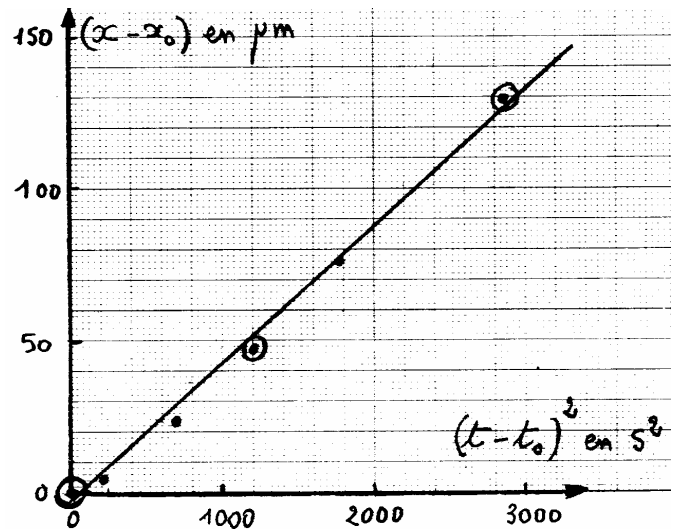


Figure 4. Représentation graphique de la quantité $a'/2 = (x-x_0)/(t-t_0)^2$. Les points encerclés correspondent aux mesures données par les trois photos de la Figure 3.

Conclusion

Si la fabrication de la balance n'est pas trop difficile, en revanche, la réalisation de l'expérience elle-même est d'une extrême difficulté, car il faut la faire dans un local parfaitement calme. Qualitativement, le fonctionnement est très spectaculaire. Quantitativement, c'est un peu plus décevant par la méthode classique, mais la méthode dynamique donne un résultat assez satisfaisant.

■