

Expérience de Foucault dans un établissement scolaire

par J. Mariano MERINO DE LA FUENTE,
et Ana M. DE DIEGO BEADE,
Valladolid (Espagne).

Résumé.

On propose dans cet article la construction et la mise au point d'un pendule dont les oscillations sont auto-entretenues par un dispositif magnéto-électronique. Il permet de reproduire l'expérience de Foucault de façon satisfaisante.

Quand, en 1851, L. Foucault brûla la corde qui maintenait le pendule immobile, loin de sa position d'équilibre, les spectateurs qui remplissaient l'enceinte du Panthéon de Paris retinrent leur respiration. Quelques instants après, le grand pendule se balançait silencieusement sous la coupole de l'édifice. Il était constitué par un fil d'acier de 67 m et par une boule de fer d'environ 17 cm de diamètre. La pointe de la partie inférieure de la boule marquait des traits sur le sable humide qui avait été disposé sur le sol. Tous ceux qui étaient rassemblés là purent constater que le plan d'oscillation (*) du pendule tournait dans le sens et la vitesse angulaire attendus à la latitude de Paris. Les spectateurs avaient une preuve directe du mouvement de rotation terrestre.

Foucault calcula la vitesse angulaire observée en fonction de la latitude du lieu (fig. 1) :

$$\omega = \omega_T \sin \varphi \quad (**)$$

ou :

$$\omega = 2\pi/86164 \text{ rad.s}^{-1} \quad (***)$$

(*) *N.D.L.R.* : Plan en première approximation. Voir un ouvrage de mécanique ou bien le B.U.P. n° 652, p. 727 : BATHIER, LAVERTU, JOUANISSON.

(**) *N.D.L.R.* : Pour l'obtention de ce résultat, voir le B.U.P. précédemment cité.

(***) *N.D.L.R.* : La durée du jour sidéral est approximativement de 86 164 s contre 86 400 s pour le jour solaire moyen. En une année (approximativement, 365,25 jours solaires moyens), il s'écoule un jour sidéral de plus que de jours solaires.

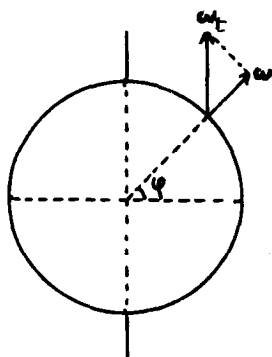


Fig. 1

Le grec Héraclide le Pontique avait suggéré, 22 siècles auparavant que la Terre tournait sur elle-même et Nicolas Copernic, depuis 1543, avait renouvelé cette théorie. Cependant, bien qu'en 1851 il fut partout admis que la Terre tournait autour de son axe, l'expérience de Foucault produisit une énorme impression du fait de son côté spectaculaire. C'est peut-être pour cela que dans les édifices publics, tels que musées scientifiques, universités, etc, on trouve des pendules de Foucault installés.

L'expérience de Foucault a une grande valeur didactique car elle suppose la confirmation de plusieurs des principes de la Physique, parmi les plus importants. Ainsi donc, il serait souhaitable que celle-ci puisse être réalisée devant les élèves.

Cette idée est certainement partagée par de nombreux professeurs, mais ils sont arrêtés par les difficultés de réalisation.

Dans cet article, nous proposons aux lecteurs la construction d'un pendule de dimensions réduites qui peut être facilement installé dans n'importe quelle salle et qui peut, en même temps, être assez vite déplacé d'un endroit à un autre, le cas échéant.

Le coût des matériaux nécessaires est modeste et les résultats qu'on obtient sont très satisfaisants. Le travail que supposent la réalisation et la mise au point de l'installation complète est relativement simple.

Pour l'essentiel, le dispositif se compose d'un pendule formé par un fil de 2 à 4 m (*) de longueur qui soutient une sphère

(*) N.D.L.R. : Si on veut observer correctement le phénomène, 2 m sont un peu courts car il faut garder une petite amplitude des oscillations.

de fer de 3 à 8 cm de diamètre. Au-dessous et à la verticale du point de suspension, se trouve une bobine dont le champ magnétique intermittent est contrôlé par un dispositif électronique; son but est d'entretenir les oscillations.

L'ensemble se compose de trois parties fondamentales : le pendule, la bobine à impulsions et le circuit électronique.

A) LE PENDULE (fig. 2 et 3).

Il est formé par un fil de coton ou de nylon de longueur variable, afin qu'il puisse s'adapter à la hauteur du plafond de l'endroit où il va être installé. Cette longueur va déterminer la période des oscillations et en aucun cas elle ne peut influencer sur le résultat de l'expérience elle-même. La masse pendulaire sera une sphère de fer munie d'un appendice avec un petit trou pour faire passer et attacher le fil (*).

La suspension doit être telle qu'aucune direction d'oscillation ne soit favorisée. Pour cela, suspendre le pendule à un anneau vissé au plafond n'est pas une bonne méthode.

Une bonne suspension (*) peut être celle décrite fig. 2. Il s'agit d'une baguette métallique à section rectangulaire (10×5 mm) recourbée en forme de U. A l'une de ses extrémités, on a percé un trou étroit dont le diamètre est légèrement supérieur à celui

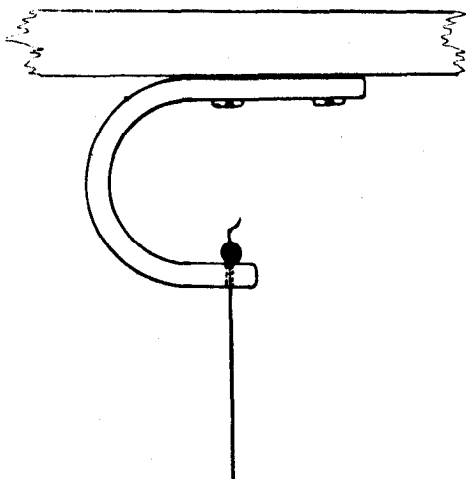


Fig. 2. — Suspension du pendule.

(*) N.D.L.R. : Une bonne suspension est décrite par JOUANISSON, B.U.P. n° 652, p. 736.

du fil. Quand celui-ci a été passé, on le fixe dans la partie supérieure à l'aide d'un plomb, comme ceux qu'utilisent les pêcheurs à la ligne.

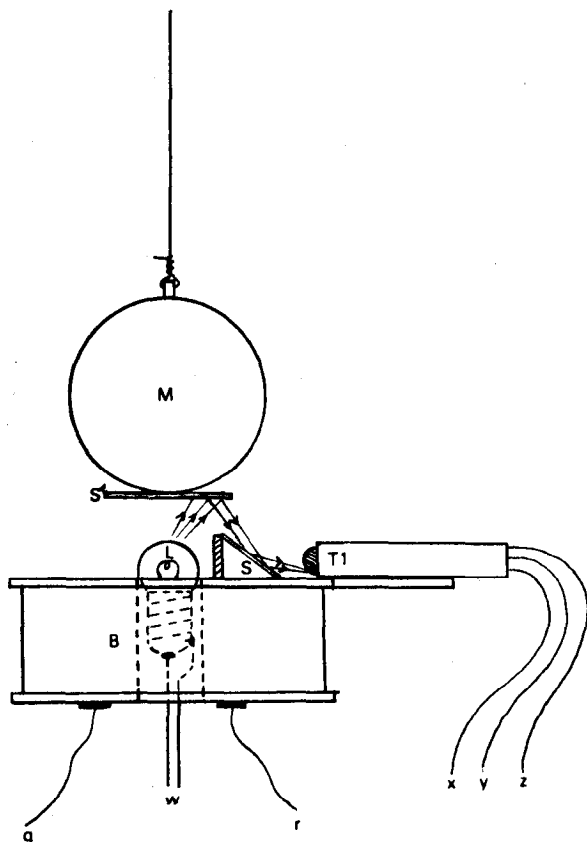


Fig. 3. — Ensemble bobine-lampe.

M = boule de fer; S et S' = miroirs; L = lampe; B = bobine; T1 = phototransistor; q et r = entrée et sortie de la bobine; w = terminaux de la lampe; x, y et z = émetteur, base et collecteur du phototransistor, respectivement.

On visse la baguette par l'autre bout à une planchette de bois fixée au plafond.

Il est très important que le trou par où passe le fil du pendule soit circulaire et qu'il ne présente pas de bavures sur

ses bords. Le jeu entre le fil et le trou doit être le plus petit possible. Il faut également être sûr que la branche inférieure du support soit dans un plan bien horizontal.

B) LA BOBINE A IMPULSIONS (fig. 3).

Elle a pour but d'attirer la masse pendulaire quand elle approche de son point de repos. Bien que ses caractéristiques puissent varier, celle que nous avons utilisée pour notre pendule a 6 cm de diamètre et 2,5 cm de hauteur, avec 1 000 spires en fil de cuivre de 0,75 mm environ, enroulées à la machine, pour obtenir une régularité parfaite. Elle peut supporter une intensité supérieure à 2 amp., contrôlée à l'aide d'un rhéostat de 20 Ω et 30 W.

On place une lampe de 12 V, 3 W à l'intérieur de son noyau (comme celles qu'on utilise dans les tableaux de bord des automobiles). On installe cette lampe en dérivation sur la bobine et on règle son éclat à volonté, à l'aide d'un rhéostat de 5 000 Ω , 5 W.

Les valeurs et les dimensions données pour l'ensemble bobine-lampe sont données à titre indicatif et on peut les adapter selon les besoins et les matériaux disponibles.

Sur le plan supérieur de la bobine, et perpendiculairement à son axe, on place l'organe photosensible, qui a pour rôle de couper le courant de la bobine quand la masse pendulaire passe au-dessus d'elle. Dans ce but, nous avons utilisé un phototransistor (T1). Son installation a été faite en collant un tube en plastique rigide de 5 cm de longueur récupéré sur un crayon feutre usagé (on doit utiliser pour cela une colle convenable) et à travers lequel on fait glisser le phototransistor jusqu'à ce que sa tête dépasse légèrement de la partie antérieure du tube.

Nous avons choisi cette disposition plutôt que de mettre le phototransistor dans le noyau de la bobine afin d'éviter, dans la mesure du possible, que la chaleur qui se dégage n'altère le fonctionnement de T1.

On fixe une petite cloison en plastique ou en bois entre la lampe et le phototransistor. Celle-ci permet d'éviter la lumière directe et sert d'appui au miroir S qui permet l'arrivée à T1 de la lumière réfléchiée par l'autre miroir, S' qui a été fixé préalablement sous la masse pendulaire (fig. 3).

Cette partie du dispositif demande beaucoup de soin si on veut que l'ensemble fonctionne correctement. Pour cela, les spires doivent être régulièrement distribuées afin que le champ magnétique présente une symétrie de révolution parfaite.

Il ne doit y avoir aucun matériau ferromagnétique dans le voisinage de la bobine car il pourrait perturber la symétrie du champ magnétique. Enfin, la bobine doit être placée en position horizontale afin que son axe coïncide avec le fil du pendule en position de repos.

C) LE CIRCUIT ELECTRONIQUE.

Il est composé de deux parties fondamentales qu'on peut voir sur la fig. 4.

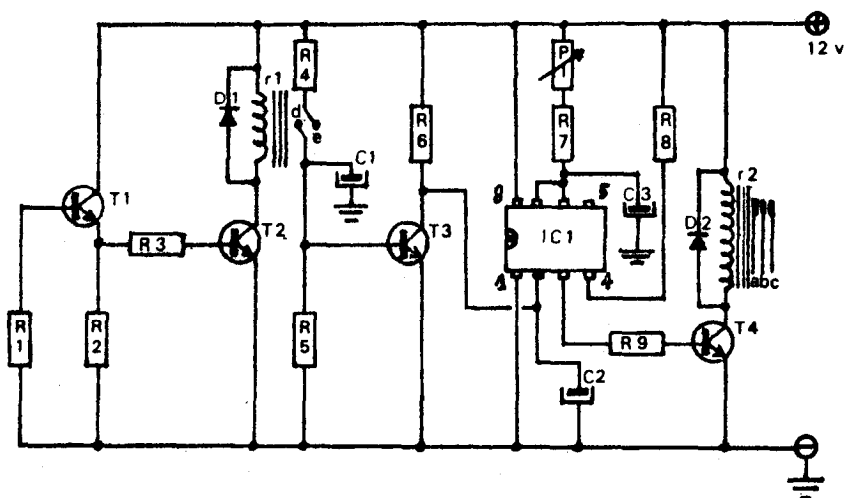


Fig. 4. — Schéma du circuit électronique.

Liste des composants :

$$R1 = 8 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = 18 \text{ k}\Omega$$

$$R3 = 82 \text{ k}\Omega$$

$$R4 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R5 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R6 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R7 = 4,7 \text{ k}\Omega$$

$$R8 = 15 \text{ k}\Omega$$

$$R9 = 470 \text{ k}\Omega$$

$$C1 = 1 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C2 = 1 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C3 = 100 \text{ }\mu\text{F}$$

$$D1 = 1\text{N}100 \text{ (Germanium)}$$

$$D2 = 1\text{N}100 \text{ (Germanium)}$$

$$T1 = \text{FPT } 100$$

$$T2 = \text{MC } 150 \text{ ou MC } 140 (*)$$

$$T3 = \text{BC } 108 \text{ ou SC } 107$$

$$T4 = \text{BD } 435 \text{ ou MC } 140.$$

$$\text{IC1} = \text{NE } 555$$

Résistances des bobines des relais $r1$ et $r2$: $\approx 250 \text{ }\Omega$.

(*) N.D.L.R. : Les transistors MC 140 et MC 150 sont du type PNP ; modifier le schéma en conséquence.

L'une d'elles est formée par les transistors T3 et T4, le circuit intégré IC1 et le relais r_2 ; cet ensemble n'est qu'un temporisateur adaptable, comme ceux qui existent dans les agrandisseurs photographiques. Sa seule particularité est que l'interrupteur de décharge a été remplacé par un relais r_1 , le phototransistor T1 et le transistor T2 (contrôlant le relais r_1).

Tous les composants du circuit peuvent être montés sur un circuit imprimé, sauf le phototransistor T1, qui doit être placé sur la bobine, comme expliqué précédemment.

Ce circuit peut être alimenté sous une tension continue comprise entre 9 et 12 V (piles, accumulateurs ou alimentation stabilisée).

Les durées définies par le temporisateur sont indépendantes des valeurs de la tension d'alimentation, quand elle reste dans le domaine indiqué.

Quand nous alimentons le circuit, le relais r_2 réalise le contact entre les points b et c . Si T1 reçoit de la lumière, il devient conducteur et polarise positivement la base de T2 (qui agit dans notre cas comme un commutateur). Quand le courant passe à travers T2, le relais de décharge r_1 met en contact les points d et e . Ceci fait que la gâchette 2 du circuit intégré IC1 se polarise convenablement à travers T3. Ce circuit est spécialement conçu pour des temporisations et on peut le trouver très aisément dans toutes les boutiques de composants électroniques. Dans notre cas, sa fonction est de polariser la base de T4 en l'obligeant à rester conducteur pendant la durée de la charge du condensateur C3, jusqu'à ce qu'il atteigne une tension entre armatures, égale aux $2/3$ de la tension d'alimentation (8 V si $E = 12$ V).

Tout au long de cette période, les contacts b et c restent séparés. Cette durée peut être ajustée entre 0,1 et 20 secondes grâce au potentiomètre P1. Au bout de cet intervalle, le courant cesse de passer dans la gâchette 3, ce qui provoque la coupure de T4 et la désactivation du relais r_2 , et par conséquent, la fermeture du circuit $b-c$.

D) INSTALLATION ELECTRIQUE ET SON FONCTIONNEMENT.

Le montage électrique du dispositif expérimental peut être compris moyennant une observation attentive des fig. 5 et 6, montrant les situations les plus critiques du cycle :

a) Phase 1 (fig. 5) : les contacts b et c de r_2 sont rapprochés et par conséquent, B et L sont en fonctionnement. A ce moment, le pendule s'approche de la position verticale et il est attiré par le champ magnétique.

b) Phase 2 (fig. 6) : le pendule dépasse la position verticale (au-dessus de l'ensemble bobine-image). A cet instant, T1 reçoit de la lumière et provoque le contact entre *d* et *e*, et en même temps, *b* et *c* se séparent. En conséquence, le courant dans B et L est coupé ; le pendule peut alors s'écarter de sa position de repos sans être gêné par le champ magnétique. Cette phase se poursuit pendant une durée qu'on peut contrôler à l'aide de P1 et qui doit coïncider avec la durée nécessaire au pendule pour aller de sa position de repos au point d'élongation maximale.

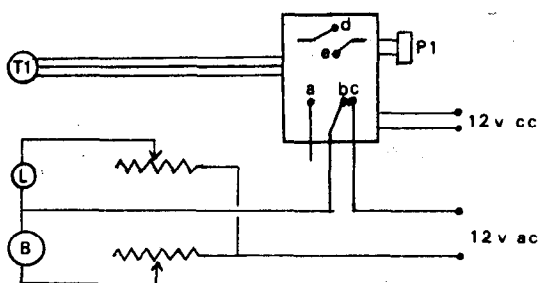


Fig. 5

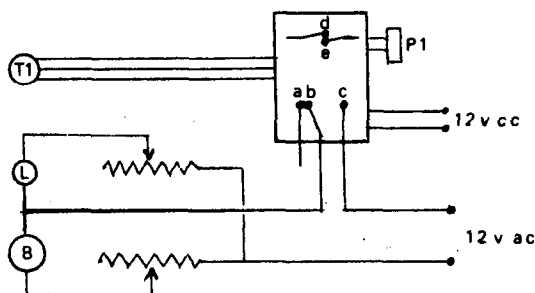


Fig. 6

Fig. 5 et 6. — Montage général du dispositif expérimental et schéma de son fonctionnement.

T1 = phototransistor ; L = lampe ; B = bobine ; P1 = potentiomètre d'ajustement de la durée, de $1\text{ M}\Omega$; *e* et *d* = contacts du relais r1, contacts « travail » au normalement ouvert : NO ; *a*, *b* et *c* = contacts du relais r2 : *bc* contact « repos », au normalement fermé : NF.

E) VERIFICATION ET MISE AU POINT.

Quand le pendule est suspendu, on place au-dessous de lui, en position horizontale, une planche carrée sur laquelle on a fixé un bristol blanc. Sur ce dernier, on a dessiné un cercle d'environ 80 cm de diamètre, échelonné de 5° en 5° , dont le rôle est de permettre d'évaluer l'angle dont a tourné le plan d'oscillation du pendule.

On mettra la bobine au centre de ce cercle, après avoir fait un trou sur la planche pour laisser passer les fils d'alimentation. Ceux-ci doivent être coaxiaux afin de ne pas altérer la symétrie du champ magnétique dans lequel le pendule évolue.

La planche doit laisser un espace entre elle et le sol pour le passage des fils. Elle doit s'adapter à la longueur du pendule pour que, entre la bobine et le miroir S', il y ait un espace d'à peu près 1,5 cm.

La lampe et la bobine seront branchées en dérivation entre les contacts *b* et *c* du relais *r2*, chacune, d'elles étant en série avec un rhéostat permettant de contrôler indépendamment l'intensité lumineuse de *L* et la valeur du champ magnétique.

Il est très important que l'axe de révolution du champ magnétique soit à la verticale du point de suspension du pendule. Pour y parvenir, on procèdera de la façon suivante :

Quand le pendule est au repos absolu, on fait passer du courant dans la bobine ; si la boule ne se déplace pas, la bobine est placée dans une position correcte. En cas contraire, il faudra corriger sa position jusqu'à ce qu'on arrive à un centrage parfait. Cette opération, apparemment compliquée, peut être réalisée en quelques minutes avec un peu d'habileté (*).

Quand le pendule oscille, il faut synchroniser le circuit électronique et le pendule en agissant sur le potentiomètre d'ajustage *P1*. La lampe s'allume quand le pendule est dans le point d'élongation maximale. Ensuite, on règle l'éclat de la lampe. Si celle-ci ne s'éteint pas quand le pendule passe au-dessus d'elle, il faut en augmenter l'éclat.

La salle de travail doit être suffisamment sombre pour ne pas perturber l'éclairement du phototransistor.

On peut contrôler l'amplitude des oscillations en agissant sur l'intensité du champ magnétique. Cette amplitude ne doit pas dépasser le rayon du cercle de référence, mais elle ne doit pas

(*) *N.D.L.R.* : Pour le lancement du pendule, on utilisera avantageusement la méthode décrite par JOUANISSON (art. cité).

non plus être trop petite car alors on apprécie mal la rotation du plan d'oscillation.

Il faut éviter tous les déplacements latéraux du pendule quand il oscille. Pour cela, le mieux est de ne procéder à des mesures, qu'au moins dix minutes après le début de l'expérience. De même, éviter les courants d'air !

L'apparition de déplacements latéraux spontanés est l'indice d'un mauvais positionnement de la bobine.

F) CONCLUSION.

La construction et la mise au point de ce pendule, ainsi que la reproduction de la célèbre expérience de Foucault constituent un travail intéressant et formateur qui peut être réalisé par un groupe restreint d'élèves en un temps raisonnable à condition de leur distribuer les tâches.

L'expérience peut être observée par toutes les classes à des heures différentes puisqu'elle dure indéfiniment.

Nous avons réalisé ce travail avec un groupe restreint d'élèves sur 2 mois ; l'expérience de Foucault a été vue par tous les élèves de notre centre.

La vitesse angulaire de rotation du plan d'oscillation dépend de la latitude qui est pour nous de $41^{\circ}37'38''$; la valeur de la vitesse angulaire est :

$$\omega = (2\pi/86\,164) \sin 41^{\circ}37'38'' = 4,8440 \cdot 10^{-5} \text{ rad. s}^{-1}.$$

Le tour complet a été réalisé en un temps de 36 h 1 min 50 s. Ceci veut dire qu'il y a un déplacement de 10° par heure, ce qui permet une observation commode en faisant seulement une marque toutes les heures sur le bristol pour repérer la position du plan d'oscillation.

Nous remercions le Professeur Ramiro MERINO, du Département de Physique Industrielle de l'Université de Valladolid, par ses inestimables renseignements relatifs au schéma du circuit électronique et au Professeur M. Luisa PÉREZ pour sa collaboration à la traduction en français du manuscrit.

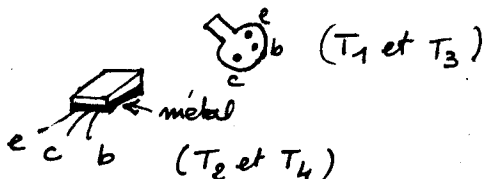
Le montage a été essayé avec les composants suivants :

T1 TFK BPW 148

T2 BD 437

T3 BC 109

T4 BD 437



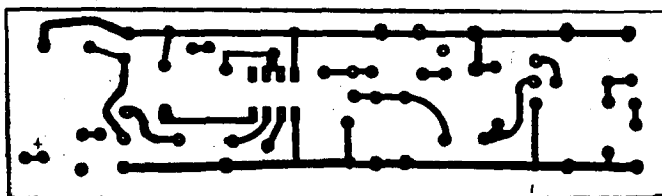
Relais r_1 SDS HB1 DC 12 V (2 A sous 30 V).

Relais r_2 FINDER 40.31 (10 A sous 250 V).

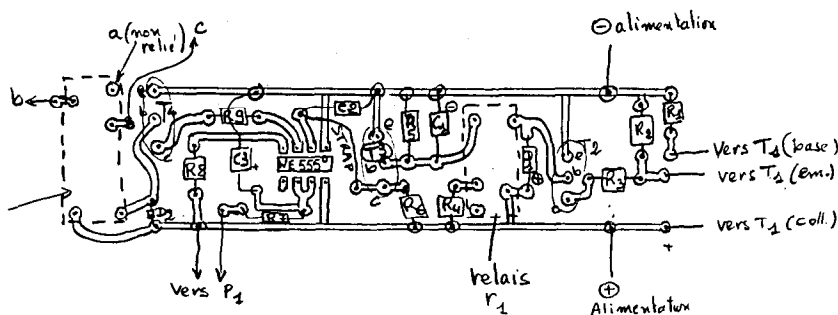
La résistance R_3 doit être modifiée ; prendre $R_3 \simeq 330 \Omega$.

Les autres composants sont inchangés.

Le câblage a été effectué sur circuit imprimé (plan ci-joint), placé dans un boîtier de $12 \times 6,5 \times 3,5$ cm. Il est commode de placer sur le boîtier un interrupteur avec voyant 12 V et le potentiomètre. La liaison avec le phototransistor se fait par une fiche DIN 5 broches et un câble blindé assez long (2 m). Sur le côté sont placées les fiches femelles pour l'alimentation et la sortie vers l'ampoule.



Côté cuivre (câblage).



Vue de dessus (implantation).

L'ampoule a été placée dans un bouchon en plastique enfoncé en force dans le trou de la bobine de façon à juste effleurer le plan supérieur (ce qui permet de ne pas mettre S').

Le pendule est une boule de pétanque « OBU » $\varnothing$ 74 mm. Cette boule est percée d'un trou $\varnothing$ 4 mm dans lequel on enfonce une cheville plastique qui permet de visser un gond $\varnothing$ 6 mm pour piton.

Le fil est du nylon 45/100 (10,5 kg) pour pêche.

La boule de pétanque est assez brillante pour permettre de supprimer le miroir S et le miroir S'.

BIBLIOGRAPHIE

- R. DUGAS, « *Histoire de la Mécanique* », Ed. Griffon, Neuchâtel (1950).
I. ASIMOV, « *Enciclopedia Biografica de Ciencia y Tecnologia* », Ed. Alianza, Madrid.
J. CATALA, « *Fisica General* », Ed. Saber, Valencia (1961).
G. BRUHAT, « *Mécanique physique* ».
LAVERTU, BATHIER, JOUANISSON, B.U.P. n° 652 de mars 1983, p. 715 à 739.
-