

LE PENDULE DE FOUCAULT-CHARRON

G. Paturel, Observatoire de Lyon

Georges Paturel a construit un pendule de Foucault dont les oscillations sont entretenues par l'ingénieux dispositif de F. Charron.

Dans ce premier article, il nous donne les détails techniques de la mise en œuvre de son expérience et les résultats obtenus.

Remettons les pendules à l'heure

Les oscillations d'un pendule pesant (pour plus de simplicité imaginez ce pendule placé à un pôle terrestre) doivent garder la même direction, disons par rapport aux étoiles, car aucune force n'agit pour la faire changer. Si la Terre tourne, et nul n'en doute aujourd'hui, on doit voir ce plan d'oscillation tourner par rapport au sol, mais en réalité, c'est le sol qui tourne. Au pôle on doit voir le plan d'oscillation faire un tour en 24 heures. Ce petit rappel sur le phénomène étant fait, venons-en à notre propos : essayer de refaire l'expérience.

Dans les cahiers Clairaut, mon collègue R. Garnier et moi-même avons publié un petit article (CC 94, p32, 2001) sur l'histoire du pendule de Foucault. Il est vrai que je me suis intéressé à cette expérience à partir du jour où j'ai exhumé d'un placard de l'observatoire de Lyon, l'article original de Foucault. Cet article rédigé pour les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris en 1851 est très instructif. La première expérience fut faite par Foucault dans sa cave avec un pendule de 2 mètres seulement, construit à partir d'un fil d'acier de moins d'un millimètre de section et d'une sphère en laiton

de 5 kilogrammes. Cette expérience est si simple dans son principe, que beaucoup ont essayé de la reproduire. En pratique, cette expérience est plus délicate qu'il n'y paraît. J'ai moi-même essuyé quelques déboires en voulant faire l'expérience avec une masse insuffisante et dans un lieu exposé aux courants d'air et aux enfants !

Dans le livre de mécanique de G. Bruhat, j'ai trouvé le schéma simplifié d'un pendule entretenu électriquement et l'auteur prétendait qu'il était facile de mettre en évidence la rotation de la Terre. C'est vrai ! Mais de là à trouver la bonne valeur pour la vitesse de rotation du plan des oscillations, il y a un fossé (voir les comptes rendus de l'école d'été de Sophia-Antipolis, 1982). Lors de la dernière assemblée générale du CLEA je parlais incidemment à mes voisins de table de l'expérience que j'étais en train de tenter, avec un pendule entretenu électriquement. Vous me croirez ou non, mais c'est pourtant la stricte vérité, j'étais en compagnie de la petite fille de l'inventeur du système décrit par Bruhat. Cet inventeur, professeur de physique à la Faculté Libre d'Angers est F. Charron, grand-père de notre collègue Béatrice Sandré. Il avait protesté auprès de Bruhat pour ne pas avoir été cité. Je voulais remettre les pendules à l'heure. C'est fait. Cela n'enlève

rien à l'immense admiration que j'ai pour les livres de physique de Bruhat, mais F. Charron devait être cité. Donc, c'est en fait un pendule de Foucault-Charron que je vais vous décrire.

Dans un prochain article j'expliquerai la physique du phénomène. Mais pour l'instant nous allons seulement nous concentrer sur la réalisation technique du pendule. Je vais décrire le pendule que j'ai réalisé mais seulement à titre indicatif ; vous pourrez essayer de faire mieux, car je suis un assez piètre expérimentateur.

Description du principe du pendule de Foucault-Charron.

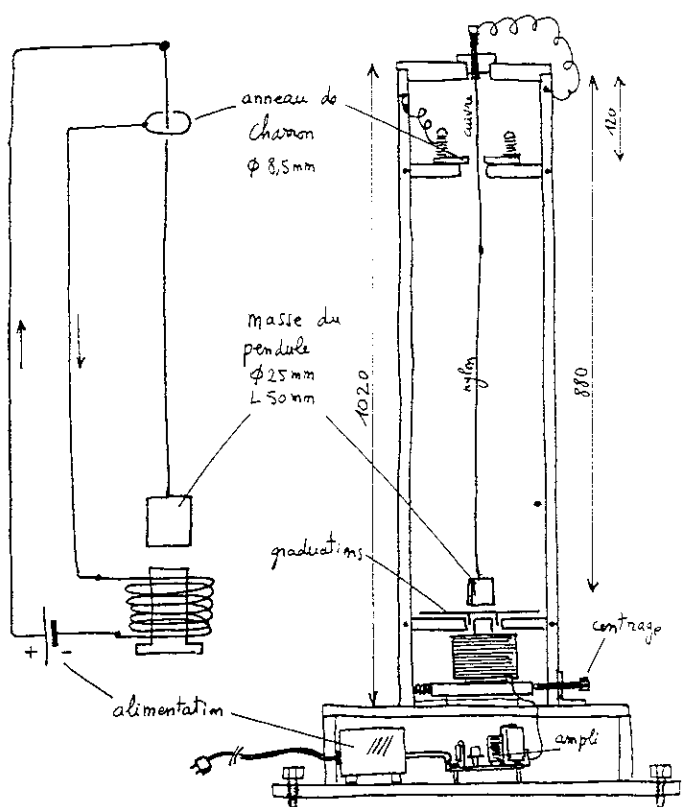


fig.1 : le principe et la réalisation

Le schéma ci-dessus fera comprendre le principe, je l'espère, mieux qu'un long discours. Commentons néanmoins. Au repos, le pendule est vertical, il n'y a pas de contact électrique entre le fil de suspension et l'anneau (dit anneau de Charron), l'électroaimant n'est pas alimenté, le système reste au repos. Si vous donnez une impulsion, le pendule commence ses oscillations. Sans alimentation il s'arrêterait bientôt, mais, l'alimentation étant branchée, le fil du pendule hors de sa position d'équilibre, va établir un contact qui alimentera l'électroaimant. Ce dernier attirera le pendule vers le centre. Deux fois par période le pendule sera soumis à une force de rappel radiale. Si le pendule est bien construit,

la force sera vraiment radiale et, en conséquence, le plan d'oscillation ne sera pas modifié. Les oscillations se poursuivront indéfiniment.

Pendant que je rédige ces lignes, j'entends mon pendule qui oscille. Je l'ai lancé ce matin et je note régulièrement la position du plan d'oscillation. Je vous communiquerai les valeurs mesurées à la fin de l'article.

Avantage procuré par l'anneau de Charron.

Pour lancer son pendule, Foucault l'avait fixé hors de la position d'équilibre avec un petit fil. Je vous reproduis les termes originaux : "...pour l'écarter de sa position d'équilibre, on l'embrasse dans une anse de fil organique dont l'extrémité libre est attachée à un point fixe pris sur la muraille... Puis dès qu'on est parvenu à l'amener au repos, on brûle le fil organique en quelque point de sa longueur ; sa ténacité venant à faire défaut, il se rompt... et le pendule... entre en marche... ". Qu'en termes élégants ces choses là sont dites !

Quand le pendule est tenu par le fil organique on pourrait penser que le pendule est immobile. Eh bien non ! En effet la muraille à laquelle le fil est attaché est solidaire de la Terre et tourne avec elle, entraînant le pendule. On croit lâcher le pendule sans vitesse tangentielle initiale et pourtant on lui communique inmanquablement une vitesse qui tend à lui faire décrire une ellipse. Muni de son anneau de Charron, le pendule va se stabiliser de lui-même. En effet, en décrivant une ellipse, le fil va frotter tangentiellement sur l'intérieur de l'anneau. Le frottement va réduire ce mouvement parasite. Seul subsistera le mouvement radial. Si, de surcroît, le pendule est entretenu électriquement, le plan d'oscillation sera parfait au bout de quelques oscillations. Vous pourrez très bien lancer votre pendule en donnant un grand coup de pied dans le bâti.

Vous comprenez donc que l'anneau ne sert pas qu'à entretenir les oscillations, il les améliore, à tel point que certains pendules libres (non entretenus) ont été munis d'un anneau de Charron, juste pour éviter que le pendule ne décrive une ellipse au lieu d'un plan.

Une question revient souvent : le fil de suspension va-t-il subir une torsion du fait du changement apparent du plan d'oscillation ? En réfléchissant au phénomène, on s'aperçoit que le fil subira bien une torsion mais, puisqu'il n'est fixé que par une extrémité, cette torsion disparaîtra au fur et à mesure. En d'autres termes la masse du pendule tournera sur elle-même et restera toujours dans la même direction par rapport au support. Il n'est donc pas besoin de prévoir des suspensions à la "Cardan".

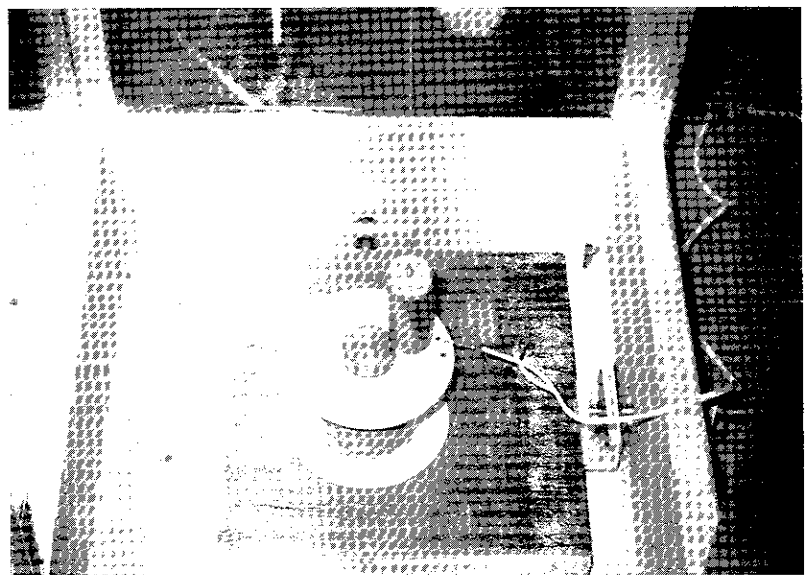
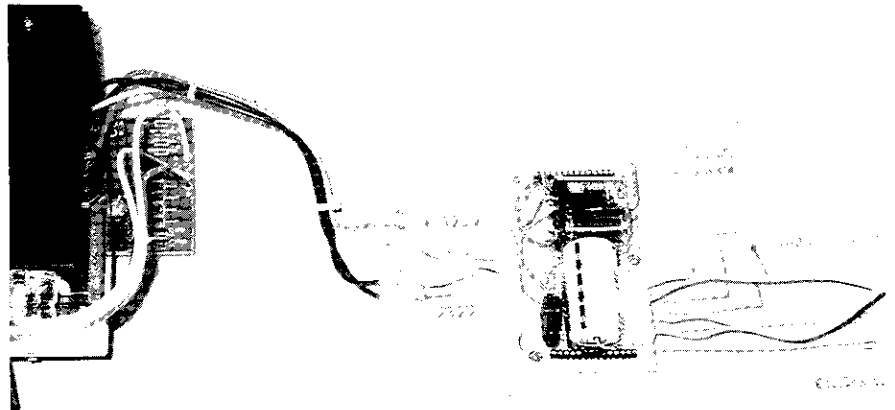
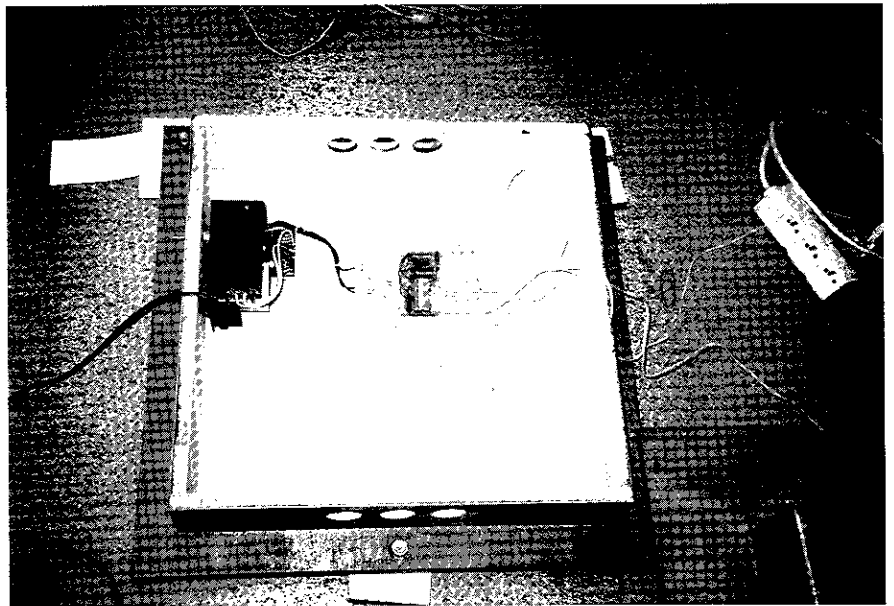
Les difficultés rencontrées

N'étant pas équipé pour réaliser des pièces mécaniques de précision j'ai rencontré une difficulté. Parfois, le pendule

se stabilisait dans une direction qu'il ne quittait plus. Parfois, le pendule tournait beaucoup plus rapidement que le mouvement de la Terre ne le laisserait prévoir. J'ai longtemps été perplexe. En analysant le phénomène j'ai trouvé une cause possible à ce comportement anormal : un défaut de symétrie dans le système : Soit le fil, au repos, ne passe pas juste au centre de l'anneau de Charron, soit l'anneau n'est pas bien circulaire (j'ai changé ma perceuse pour faire un anneau parfait), soit encore l'électroaimant n'est pas parfaitement centré sous la position du pendule au repos. Cela m'a conduit à peaufiner les réglages. Je vous les décrirai plus loin.

Une autre difficulté provenait de l'oxydation du contact entre le fil et l'anneau. Le problème a été résolu en fabriquant un petit amplificateur qui permet de réduire l'intensité du contact.

Une dernière difficulté m'a amené à concevoir une amélioration simple mais très efficace. Quand le fil de suspension établit le contact qui va alimenter l'électroaimant, le pendule est en train de s'écarter de sa position d'équilibre. La masse du pendule subit donc d'abord un freinage avant de subir l'accélération centrale qui lui communiquera le petit surplus d'énergie nécessaire à la compensation des frottements. De ce fait l'amplitude est réduite. Pour augmenter le temps d'action de l'électroaimant on est conduit à réduire le diamètre de l'anneau de Charron. Mais alors le centrage devient plus difficile. La solution trouvée est la suivante : On place aux bornes de l'électroaimant un condensateur de forte capacité (2200 μF). Quand le contact est établi, le courant qui devrait normalement aller dans l'électroaimant, va d'abord charger le condensateur ; d'où un retard de l'action de l'électroaimant. Puis, quand le contact se coupe lors du retour vers le centre de la masse du pendule, le condensateur se décharge dans l'électroaimant en donnant ainsi une ultime impulsion à un moment très favorable puisque le pendule est plus proche de l'électroaimant.



La réalisation technique

Le bâti : L'ensemble du système est abrité dans un caisson vitré pour éviter les courants d'air. Ce caisson a été étudié et réalisé par un élève d'un IUT, J. Lapostole. Nous donnons, à la figure 1, les cotes principales du pendule. La partie inférieure, qui constitue le socle, abrite une alimentation électrique « 5V continu » récupérée sur un ordinateur hors d'usage. L'alimentation possède une sortie 12 V inutilisée. Cette alimentation alimente l'amplificateur et l'électroaimant. Nous donnons une photo de l'intérieur du socle.

Les photos ci-contre représentent l'intérieur montrant la partie électronique et l'électroaimant.

L'amplificateur : Il est donné, à la figure 2, à titre d'exemple, car les éléments ont tous été récupérés sur de vieux appareils. J'ai pris l'unique transistor au hasard dans mon stock de pièces récupérées. Comme il possédait un radiateur je l'ai choisi en pensant qu'il devait avoir une puissance suffisante. Là encore, le schéma est indicatif et, selon les pièces que vous aurez en votre possession, vous pourrez adapter la réalisation. On peut aussi se passer de cet amplificateur pour commander directement l'électroaimant à partir du contact entre le fil et l'anneau de Charron. Le petit condensateur aux bornes du contact du relais supprime l'étincelle qui pourrait l'abîmer. Ce type de contact est très résistant, mais il est si facile de le protéger qu'il ne faut pas s'en priver.

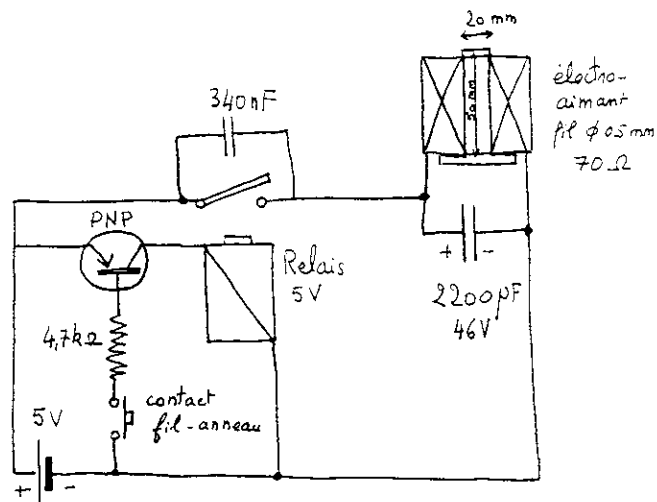


fig.2 : le schéma électronique

La suspension du pendule : Le fil du pendule doit être métallique. Il est en cuivre pour la partie supérieure qui intervient pour établir le contact. La partie inférieure est un fil de pêche en nylon très fin (30/100). Il fallait un fil très souple pour que la masse du pendule reste bien verticale au repos. Un fil plus rigide utilisé auparavant imposait une position bancal à la masse cylindrique du pendule. De ce fait la

symétrie axiale était rompue. Le fil supérieur en cuivre est gainé de plastique dans la zone de fixation. Il a un diamètre total de 0.5 millimètre (gaine plus âme de cuivre monobrin). Il s'agit d'un fil utilisé en électronique pour le « wrapping ». Le fil est passé dans le mécanisme récupéré sur un portemine "0,5". Pour que le fil ne glisse pas dans le portemine un sucre d'électricien consolide le tout. Le fil de Nylon est lui aussi fixé sur la masse du pendule par un mécanisme de stylo.

L'anneau de Charron : En fait d'anneau, il s'agit un trou (diamètre 8,5 mm) dans une plaque de cuivre. La plaque de cuivre est pressée sur le bâti de bois par deux vis munies chacune d'un ressort et d'une rondelle. Ce montage permet de déplacer l'anneau de Charron pour ajuster le centrage. Ce système mériterait d'être amélioré pour permettre un réglage plus "micrométrique".

L'électroaimant : La masse de fer centrale a été faite au tour par un collègue mécanicien. L'enroulement est fait simplement d'une bobine de fil à wrapper à moitié vide, récupérée. La résistance ohmique est de 75 Ω. Cet électroaimant est fixé sur une plaque de bois, tirée par des ressorts et poussée par des vis accessibles de l'extérieur du boîtier. Les vis poussantes prennent appui sur deux bords de la plaque de bois. Ce mécanisme rustique permet de faire le réglage du centrage, pendule au repos.

Les graduations : J'ai découpé un disque de carton sur lequel j'ai tracé des cercles concentriques espacés d'un centimètre et des rayons tous les 10 degrés. Sous le carton, j'ai collé une bague en plastique, bien centrée, et d'un diamètre intérieur égal au diamètre du fer de l'électroaimant. Ainsi le disque des graduations, une fois posé sur le fer de l'électroaimant, est parfaitement centré. Les cercles concentriques servent à faciliter les réglages.

La mise en service

Il faut commencer par les réglages. On règle la parfaite horizontalité du bâti avec un niveau à bulle. Trois vis du socle permettent un ajustement facile. Le pendule étant bien au repos, on ajuste la position de l'électroaimant avec le système « tirant-poussant ». Le plus petit cercle dessiné sur la plaque de graduation a pour diamètre le diamètre de la masse du pendule. Le centrage à l'œil est facile. Reste à régler le centrage de l'anneau de Charron. J'ai procédé ainsi (mais nous devrions pouvoir faire mieux). J'ai fait balancer le pendule avec une amplitude minimale et, pendant ces faibles oscillations, je réglais la position de l'anneau pour que le contact s'établisse bien des deux côtés des oscillations. Les oscillations étant bien symétriques il fallait qu'elles produisent un contact sur les deux bords opposés de l'anneau (ou pas de contact du tout si l'amplitude est trop faible). J'ai répété l'opération dans la direction perpendiculaire. Ce réglage à l'avantage de pouvoir être fait quand la dernière vitre est fermée. Le lancement est donc prêt. On donne quelques impulsions sur le boîtier, en résonance avec le pen-

dule. Quand l'amplitude devient suffisante, on entend le relais qui commence à claquer en cadence... le pendule est parti. L'amplitude augmente progressivement et la trajectoire du pendule se stabilise, tic, tac, tic, tac...

Les mesures.

Ce matin j'ai lancé le pendule à 9h 30. Il est 23h il balance encore... Le lendemain, le pendule balance encore, j'allais dire imperturbablement, mais non, car son plan d'oscillation tourne, et dans le bon sens. Reste à voir s'il tourne à la bonne vitesse.. La figure 3 donne la direction des oscillations (mesurée en degrés par rapport au zéro arbitraire des graduations) en fonction du temps. Les mesures s'étendent sur plus de 50 heures. Le plan d'oscillation a tourné de plus d'un tour (près de 500 degrés). On remarque immédiatement sur le graphique qu'il y a une périodicité inattendue. Elle résulte probablement d'un défaut de symétrie axiale (électro-aimant ou anneau de Charron mal centré). J'ai tracé la droite sur laquelle les points devraient s'aligner à notre latitude ($45,7^\circ$). La Terre tourne trop lentement à Saint-Genis Laval. Dans un prochain article je reviendrai sur ces résultats pour donner les explications générales, bien sûr, mais aussi pour expliquer cette apparente lenteur locale de la rotation de la Terre.

Quoi qu'il en soit, l'expérience est très spectaculaire car en très peu de temps on peut mettre en évidence la rotation de notre bonne vieille Terre. Mais attention, les alignements doivent être faits avec le plus grand soin.

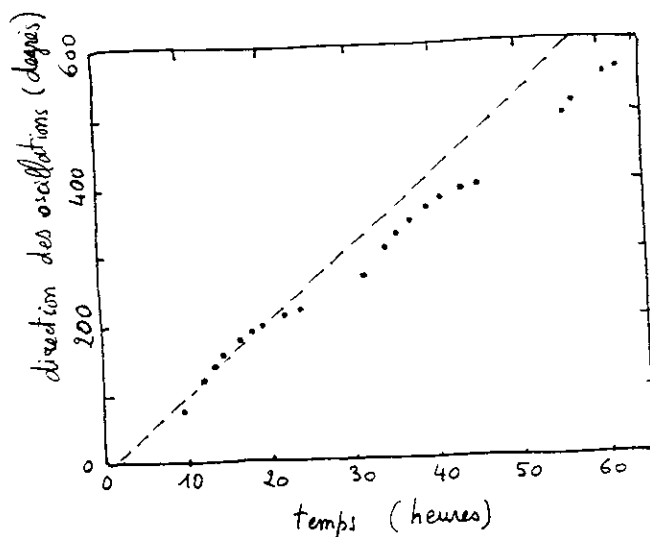


fig.3 : les observations

Bonne chance à ceux qui seront tentés par cette expérience.

Remerciements :

Je remercie B. Sandré qui m'a donné des articles très intéressants sur le pendule de Foucault, amélioré par F. Charron son grand-père.