

UN PENDULE DE FOUCAULT AU PRYTANÉE DE LA FLÈCHE

1. GENESE

Beaucoup d'établissements scolaires possèdent une collection d'instruments anciens aux noms étranges, pronctomètres, cathétomètres, etc... Notre lycée national militaire, fondé en 1808 par Napoléon, recèle une panoplie d'objets hétéroclites, mystérieux et poussiéreux, perdus dans de vieux placards du XIX^{ème} siècle alignés sous des plafonds plus que tricentenaires ; les Jésuites occupèrent ces lieux jusqu'en 1762.

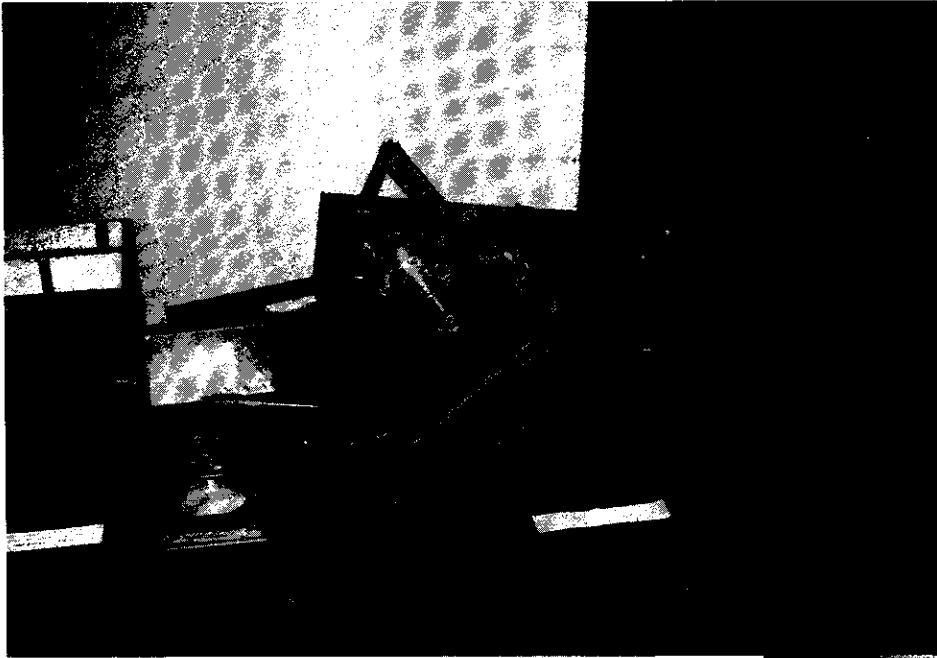
En explorant le contenu des armoires à collection, mon attention fut attirée par trois magnifiques télescopes à miroirs de verre signés Léon Foucault. Par ailleurs, une boîte portant l'étiquette "photomètre de Foucault" rappelait les travaux de ce grand scientifique expérimentateur du siècle passé. A la même époque paraissait le livre d'Umberto Ecco "Le Pendule de Foucault" qui nous remet en mémoire l'une des plus spectaculaires expériences scientifiques du XIX^{ème} siècle : celle du Panthéon réalisée par Foucault et son collaborateur Froment en mars 1851. Le grand public comme les savants de l'époque virent la Terre tourner au travers du balancement lent et majestueux de ce pendule de 28 kilogrammes placé à l'extrémité d'un fil de 67 mètres de long !

Faisant quelques recherches dans les rayons de notre bibliothèque riche d'ouvrages de Newton et d'Arago, je constatai la présence de nombreux documents précisant les conditions de cette expérience. Toutes les conditions étaient réunies pour préparer une exposition sur la physique du XIX^{ème} siècle où l'on présenterait le pendule de Foucault. Restait à trouver un lieu d'expérience : la chapelle ferait l'affaire...

2. CONSTRUCTION

La première étape a consisté à trouver 15 kilogrammes de plomb chez un ferrailleur local pour 120 francs environ. Les laborantins, MM.Cireau et Papin ont découpé puis fondu en petits lingots de 0,5 kg cette masse tout en enlevant les impuretés qui surnageaient. M.Guillard, notre ingénieur, imagina un montage permettant de faire fondre et de couler dans un ballon de verre à fond rond environ 11 kg de ce plomb. Cette opération délicate terminée, il resta à démouler en cassant le ballon et à récupérer une pseudo boule homogène en plomb.

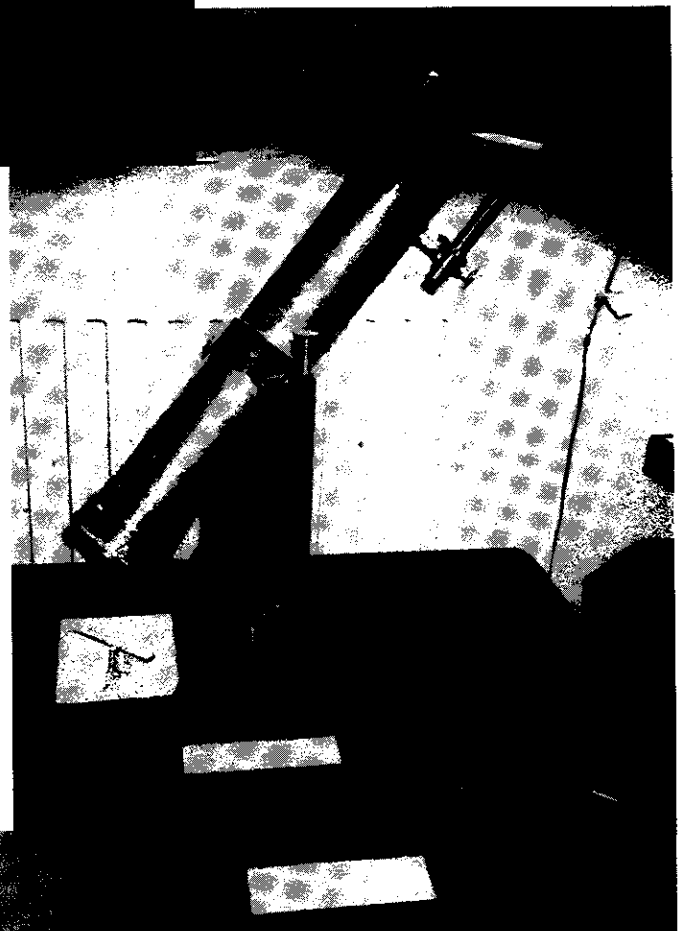
Mon père, professeur de mécanique générale en retraite, s'est proposé pour usiner la sphère à 0,05 mm près, y ajouter un stylet et confectionner un système d'attache du fil d'acier. Il s'attaqua également à la réalisation du joint à la cardan nécessaire à la fixation de la partie



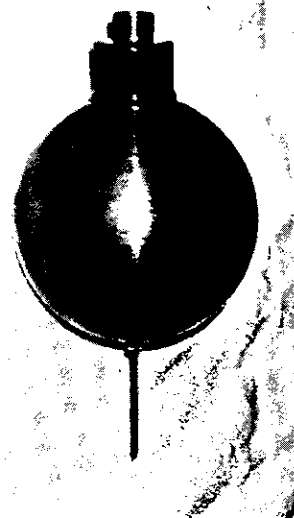
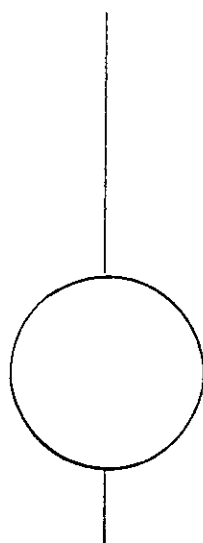
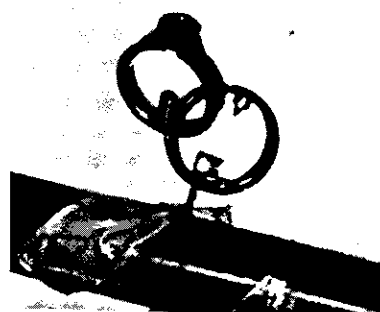
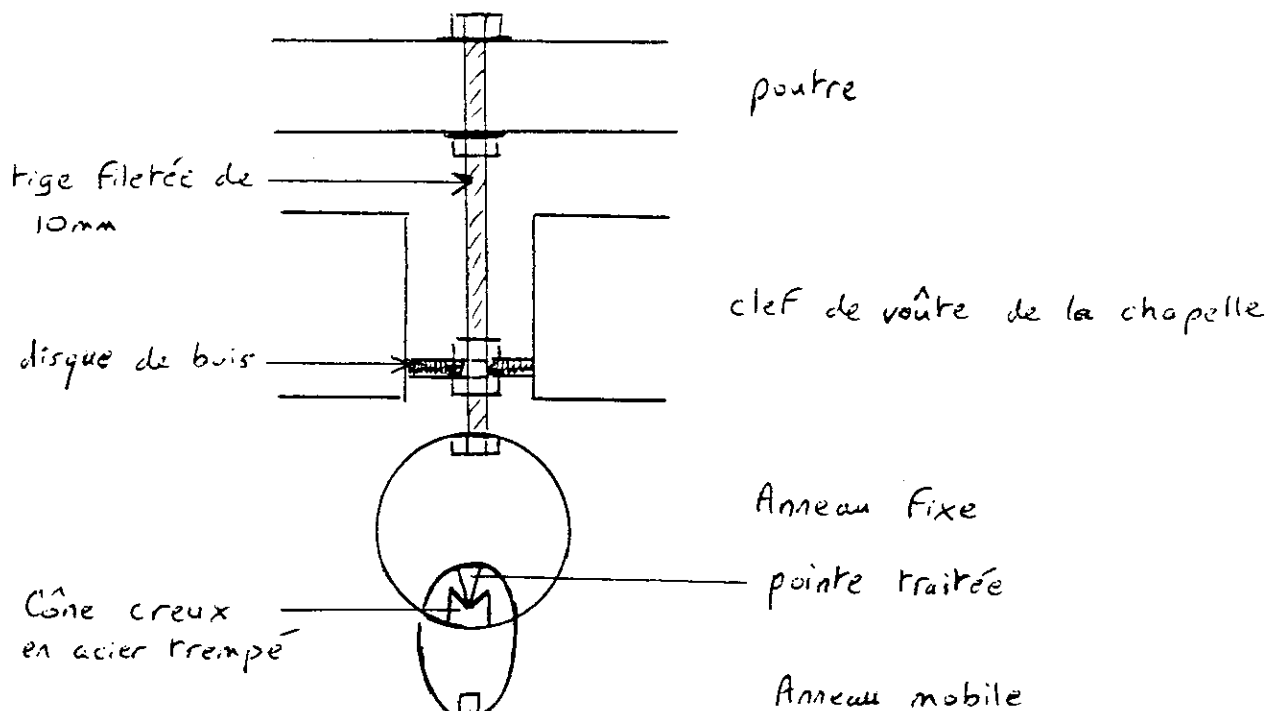
Télescope en bois,
à miroir de verre
taillé par L.Foucault;
réalisation Sécretan
vers 1860
(collection Prytanée N.M.)

Télescope de Foucault
en métal
cédé par l'Ecole Polytechnique
au Prytanée
vers le début du XX ème siècle

Boîte du photomètre
de L.Foucault. 1865
(collection P.N.M.)



Héliostats du début du
XIX ème siècle.
A gauche, instrument
fabriqué dans les
ateliers de Duboscq qui
travailla avec Foucault
(collection P.N.M.)



supérieure du fil d'acier et qui permet la libre rotation du plan d'oscillation : un anneau fixe comportant un cône creux en acier trempé en supporte un autre, mobile sur 180° environ, dont la pointe également traitée vient "s'asseoir" sur le siège conique précédent.

Une corde à piano de 0,5 mm de diamètre , enroulée et pincée à chaque extrémité par un ensemble vis-écrou a été choisie pour lier la masse à son support (60 F les 100 m).

Deux mois avant l'exposition, les premiers essais en vraie grandeur commencèrent avec un pendule de 17,50 m à vide soit 17,56 mètres entre l'axe et le centre de la sphère. L'installation de la partie supérieure sur une des clés de voûte de la chapelle me permit d'admirer la charpente en coque de navire retournée faite de châtaigniers parfois immenses un chef d'oeuvre de l'art des charpentiers du XVII ème siècle...

3. MESURES

D'emblée, le plan d'oscillation du pendule montra une forte propension à tourner dans le sens des aiguilles d'une montre. Restait à vérifier quantitativement la valeur et la régularité de la déviation.

La masse était lâchée sans vitesse initiale par destruction à la flamme d'une allumette d'un fil retenant le pendule à 2,50 m de sa position d'équilibre (fig 1). La direction initiale d'oscillation était repérée par un faisceau laser passant par la corde à piano à l'équilibre et le stylet inférieur en position de départ. Un tas de sable humide de forme régulière placé à $d = 2,00$ m de la position d'équilibre pouvait être entamé par le doigt d'acier de la boule de plomb (fig 2). La marche du pendule fut alors évidente et mesurable (fig 3, 4 et 5). La courbe (C_1) donne le déplacement latéral x (en mm) en fonction du temps. L'épaisseur de 2 mm du stylet explique l'incertitude sur l'ordonnée à l'origine.

Comparons avec la valeur théorique ; la vitesse angulaire de rotation du plan d'oscillation est donnée par $\Omega \sin \lambda$ où Ω représente celle de la Terre sur elle-même et λ la latitude du lieu. Ici $\lambda = 47^\circ 42' 04''$

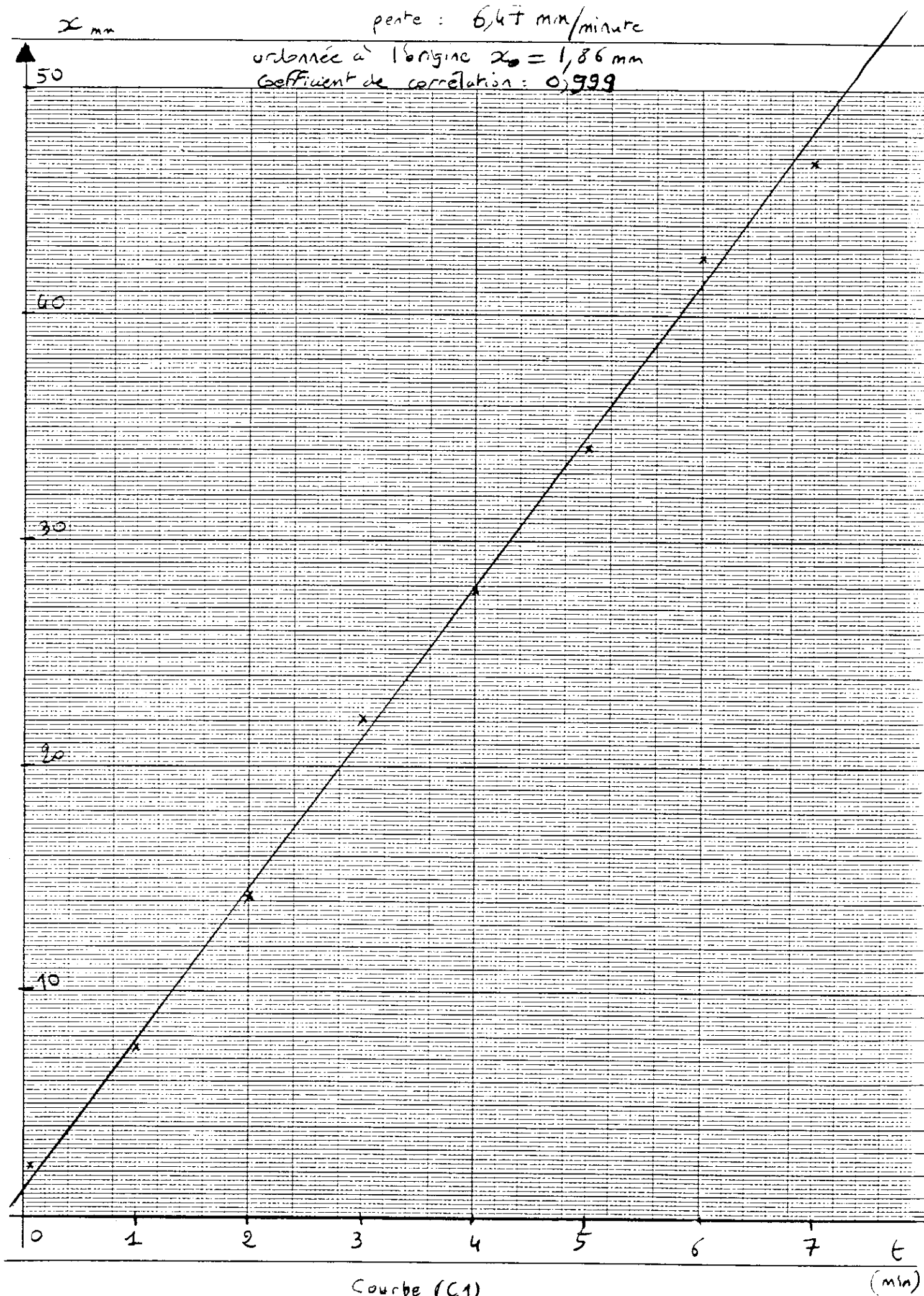
$$x = \Omega \sin \lambda . d . t \quad (x \text{ et } d \text{ en mètres, } t \text{ en secondes})$$

$$x = 5,353 . 10^{-5} . 2 . t$$

Soit le résultat théorique $(x/t) \simeq 6,472$ mm par minute.

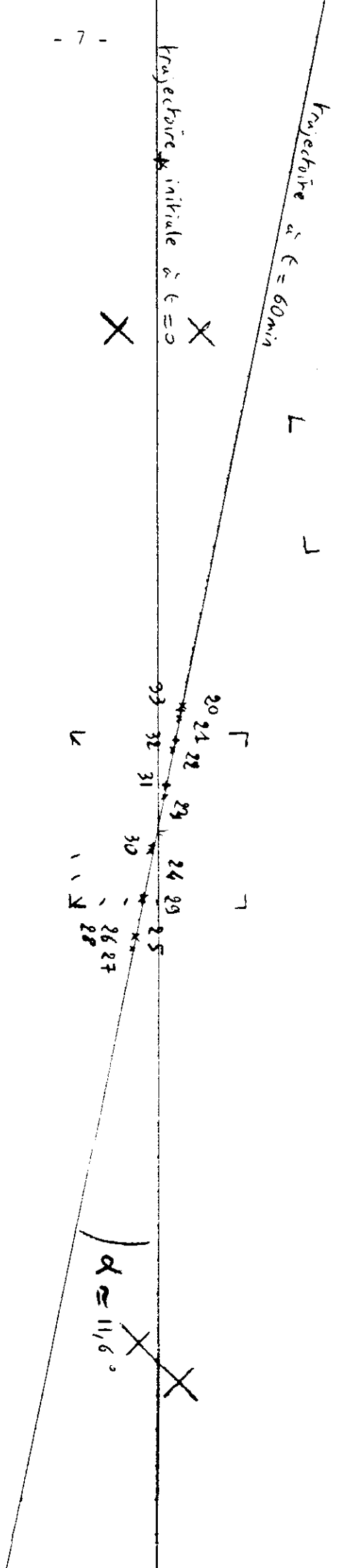
Le résultat mesuré sur le dispositif de l'expérience est $(x/t) \simeq 6,47$ mm par minute à 4% près environ ; l'écart avec le résultat théorique est de l'ordre de grandeur de l'incertitude des mesures.

Mais sur une durée plus grande, le pendule oscillait-il régulièrement? Pour le savoir, une série de clichés a été réalisée à l'aide d'un appareil photographique équipé d'un moteur d'entraînement de la pellicule et placé presque à la verticale de la position d'équilibre,



X

- graphique C2 -



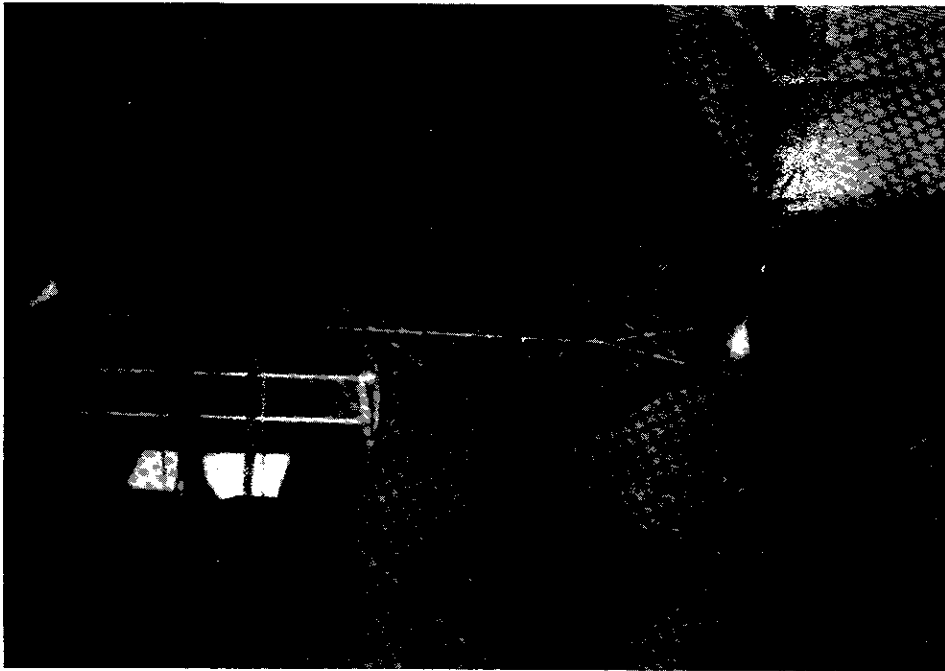


fig 1

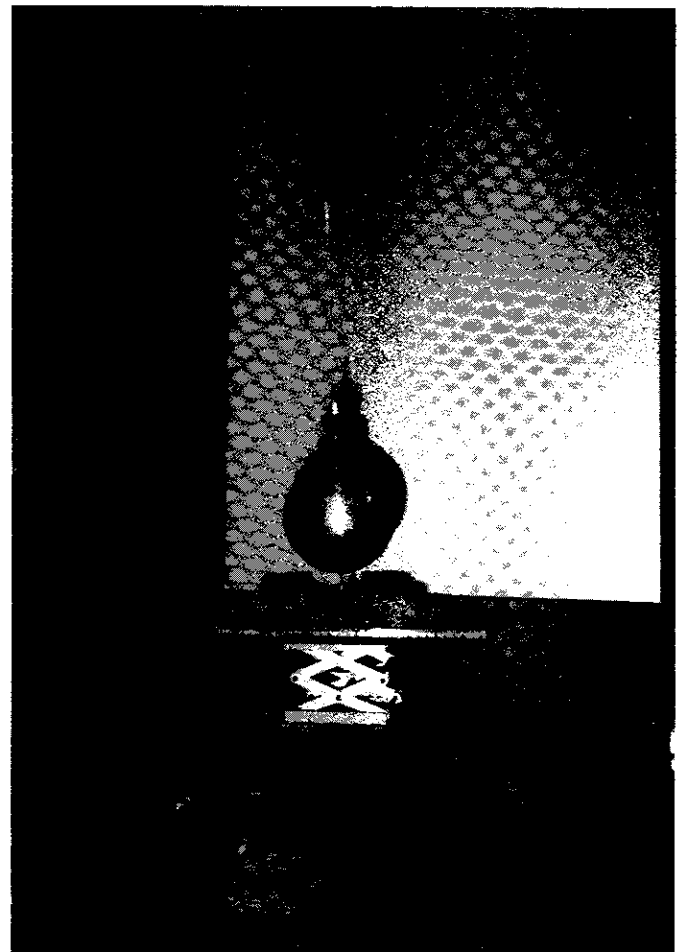
la sphère en position
de départ.

A gauche, le laser
d'alignement

fig 2

Le pendule ronge le sable.

On remarque l'éclairage
pour porte une ombre chinoise
agrandie sur l'écran.



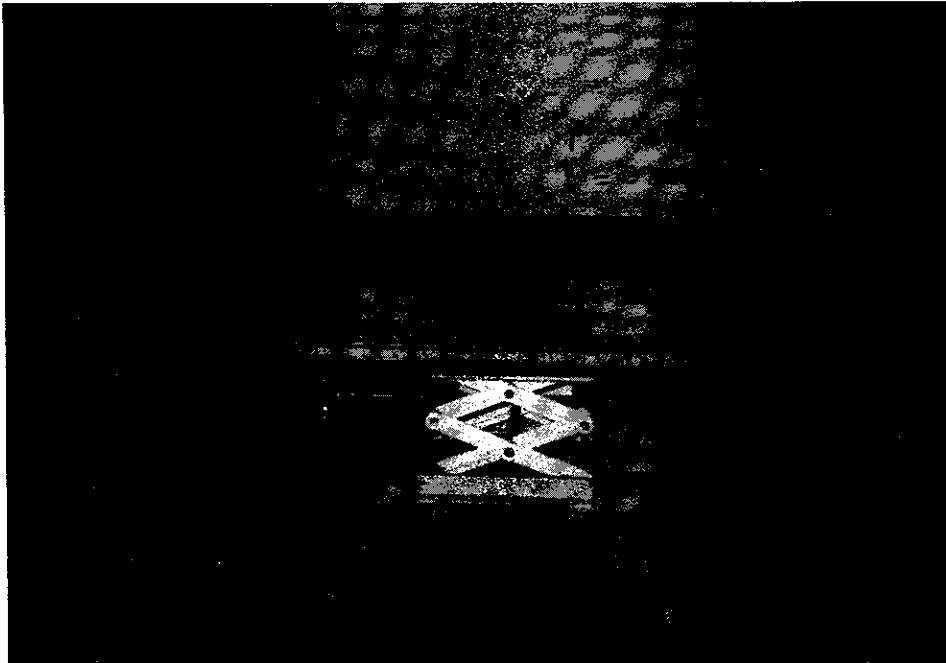


fig 3

fig 4

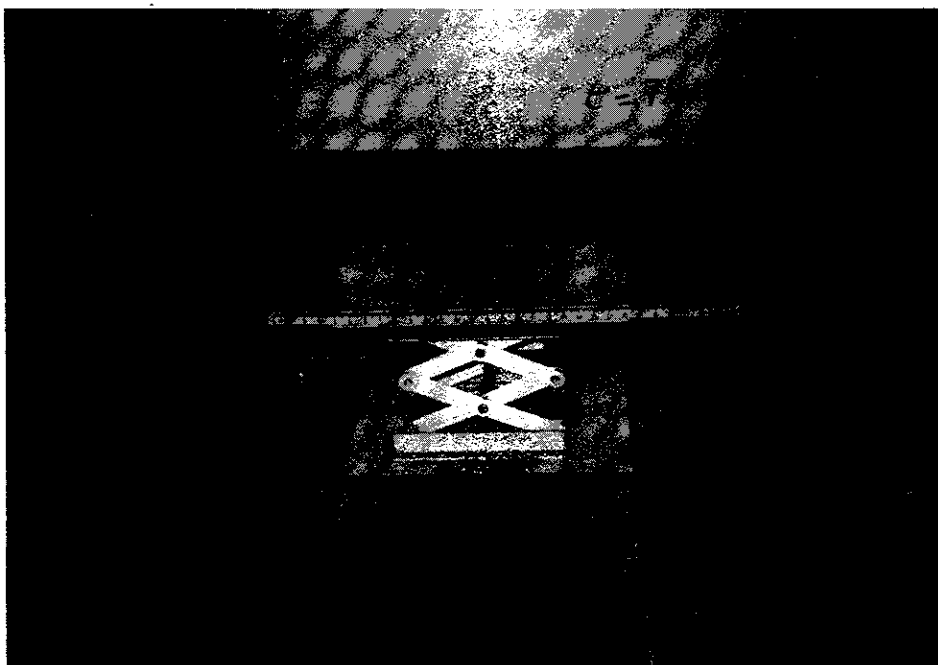


fig 5

à 18 m au-dessus du sol. Soixante minutes (± 10 secondes) après le lâcher, l'angle formé par la direction initiale et celle du mouvement était de $\alpha = 11,6^\circ \pm 0,1$ (graphique C2) or la formule précédente prévoit en théorie

$$\alpha = \Omega \sin \lambda \cdot t = 5,393 \cdot 10^{-5} \cdot 3600 \cdot 180 \simeq 11,12^\circ \text{ par heure}$$

L'écart est donc de 4,5%, ce qui est tout à fait raisonnable compte tenu des incertitudes de mesure. Le pendule avait donc une marche régulière et exacte.

Pour une bonne régularité et précision de l'expérience, il fallait s'assurer que les conditions d'approximation de Foucault étaient réunies. La plus importante réside dans le caractère constant de la tension du fil de suspension. En d'autres termes notre pendule ne doit pas être sphérique c'est à dire que la variation d'altitude h du centre d'inertie de la boule doit rester négligeable devant la longueur l du pendule. Ici

$$h/l = 0,175/17,56 \simeq 1,01\% \text{ au maximum.}$$

Notons que la longueur l peut être déterminée par la mesure de la période des oscillations ; ici, en pratique $T_0 \simeq 8,4105$ au lieu des 8,4065 prévues par la théorie du pendule simple pour $l = 17,56$ m soit une erreur de l'ordre du centimètre. Bouasse, dans "Gyroscopes et projectiles" (éd Delagrave) donne la condition $3/8 a^2/l^2 \leq 10^{-2}$ où a est l'amplitude ; soit $a \leq 2,86$ m condition toujours réalisée dans notre manipulation.

Mais je n'ai pas encore parlé de l'influence de la résistance de l'air. L'amplitude du mouvement était divisée par 2 en 33 minutes (+ 2 minutes environ) soit un décrétement logarithmique de $3,15 \cdot 10^{-3}$ environ. Cette décroissance importante devait être due à l'insuffisance de la masse du pendule, à peine dix kilogrammes.

Enfin, abordons l'ellipticité du mouvement qui apparaissait parfois assez nettement à l'oeil mais que la photographie "aérienne" n'a pu mettre en évidence par manque de précision. Une série de clichés prise cinq minutes après le lâcher a montré que l'ellipticité, petit axe Y_0 sur grand axe X_0 était inférieure à $1,8 \cdot 10^{-3}$. Or la théorie indique que

$$Y_0/X_0 = (\Omega \sin \lambda) / 2\pi / T_0 = 7,21 \cdot 10^{-5}$$

est absolument indétectable. Soit en effet 0,18 mm pour une amplitude de 2,5 m. Il semblerait donc que "l'ellipse" parfois observée s'explique par une vitesse initiale non nulle.

Quant aux dissymétries du pendule dans sa période d'oscillation suivant deux axes orthogonaux, elles n'ont pas été mises en évidence.

4. PRESENTATION AU PUBLIC

Présentée pendant quinze jours sur rendez-vous et durant un week-end complet par une équipe de cinq personnes (MM. Baron, Cosnard, Guiffard, Le Fur et Raballand), cette expérience "historique" fut observée par plus de quatre mille personnes dont deux mille scolaires (du CM1 à la Math-Spé) en septembre 1990.

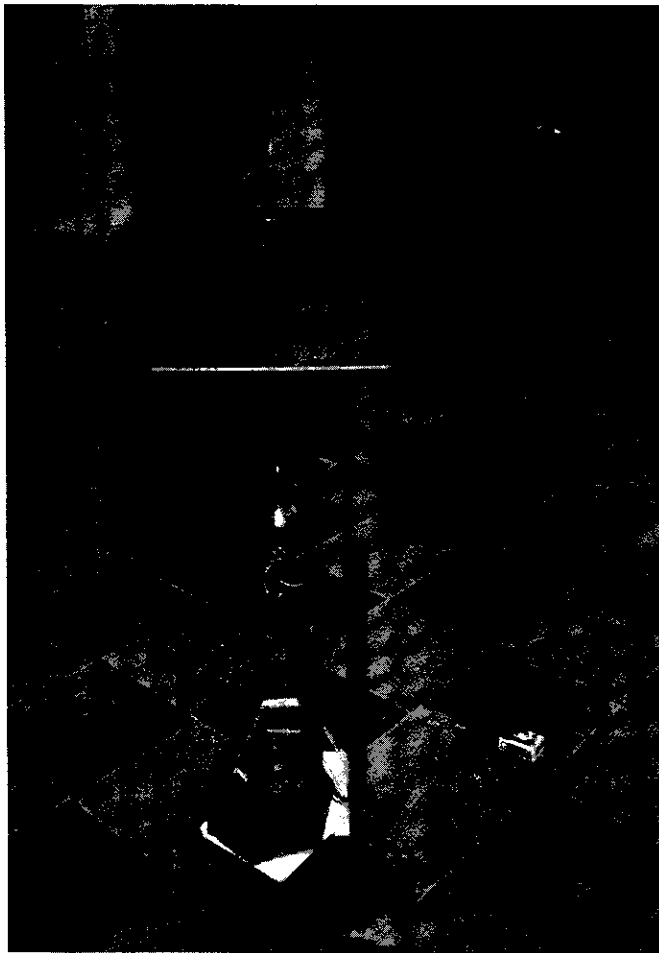
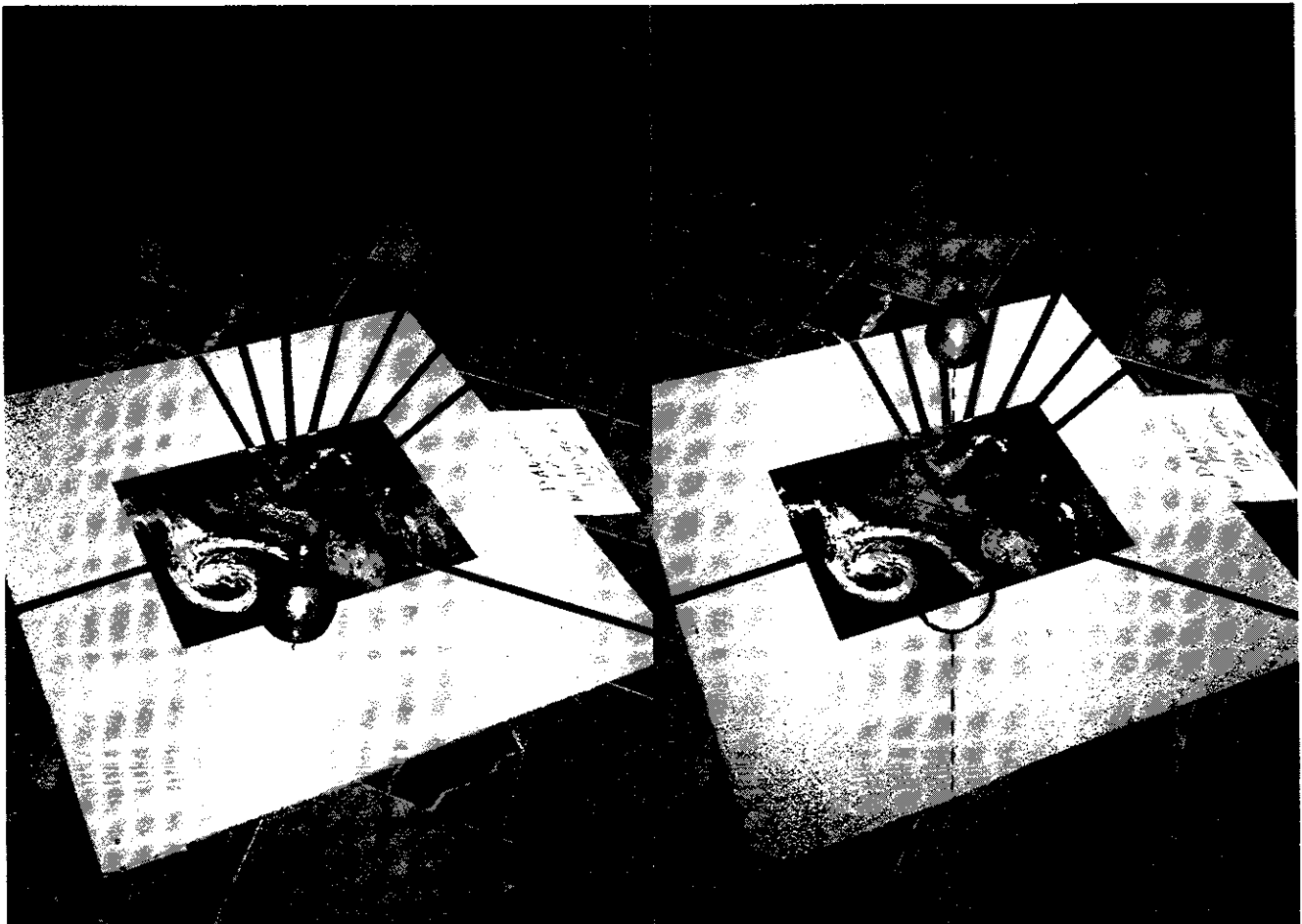


fig 6

L'ensemble de l'expérience

Figures 7 et 8

Une oscillation du pendule 2 h 15 min après son lancement



L'observation de l'avance du plan d'oscillation se faisait par projection en ombre chinoise du tas de sable humide qui était rongé en 7 à 8 minutes par le stylet du pendule. Le public pouvait revenir une heure plus tard et constatait l'ampleur du phénomène par comparaison avec des graduations placées sur un plateau à la verticale du point de suspension. Chaque intervalle angulaire correspondant à $11,2^\circ$ soit une heure d'expérience (fig 6, 7 et 8).

L'impact auprès du grand public comme des scolaires était certain et tangible. Chacun y allait de son interprétation et cherchait la "faille" dans l'explication "officielle"... N'a-t-on pas entendu tel élève de l'école primaire s'étonner de ce que la chapelle n'entraîne pas le pendule dans sa rotation par rapport aux étoiles, question fondamentale. A un niveau plus élevé, le caractère non galiléen du référentiel terrestre ne faisait plus de doute, les explications ne se perdaient plus dans le tourbillon dépressionnaire des nuages d'un cours théorique.

5. CONCLUSION

Au travers de cette expérience ou d'autres présentées à l'occasion de cette exposition sur la physique au temps de Foucault, il apparaît que l'histoire des sciences est un excellent support pédagogique pour la vulgarisation ou l'enseignement. Pour les professeurs, ce contact avec un public très varié fut une expérience très enrichissante et encourageante.

Enfin, cette réédition à petite échelle de la démonstration du Panthéon constitue un hommage à un grand scientifique expérimentateur dont les inventions géniales marquent encore notre temps. Ce pendule inspira à Léon Foucault le gyroscope (fig 9 et 10) qui équipe tant d'avions et de fusées.

Pierre Le Fur

BIBLIOGRAPHIE :

Foucault et ses pendules par S.Deligeorges (éd Carré)
Astronomie populaire d'Arago, tome 3 ; Paris 1856
Bulletin de l'Union des Physiciens, n°652, mars 1983
Gyroscopes et projectiles par H.Bouasse (éd Delagrave, 1923)
Le pendule du Panthéon par C.Flammarion, in Revue Scientifique (01/11/1902)