

Un pendule de Foucault au Prytanée de la Flèche

par Pierre LE FUR

1. GENÈSE

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 comportant 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 tourner la Terre au travers du balancement lent et majestueux de ce pendule de 28 kilogrammes placé à l'extrémité d'un fil de 67 mètres de haut !

Faisant quelques recherches dans les rayons de notre bibliothèque riche d'ouvrages de Newton ou 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...

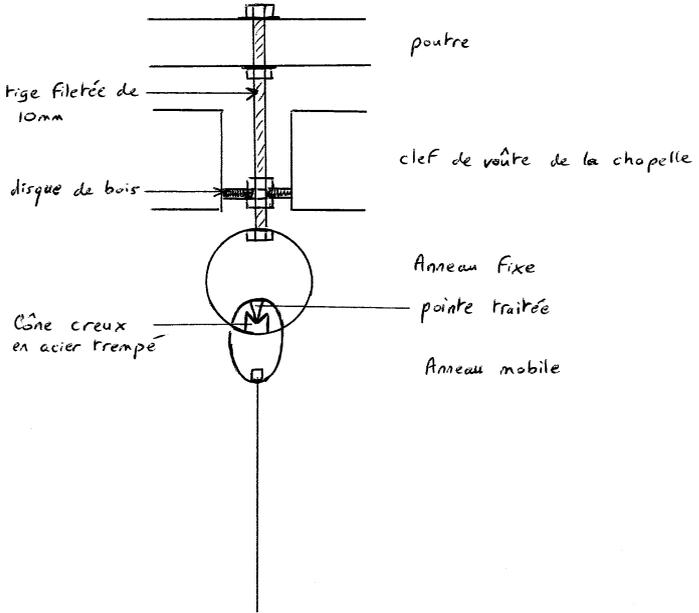


Figure 1

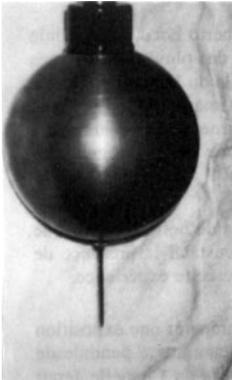


Figure 2

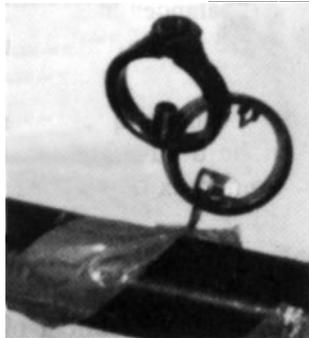


Figure 3

2. CONSTRUCTION

La première étape a consisté à trouver 15 kilogrammes de «plomb» chez un ferrailleur local pour 120 francs environ. Les laborantins, M. CUREAU et M. PAPIN, ont découpé puis fondu en petits lingots de 0,5 kg cette masse tout en enlevant les impuretés qui surnageaient. M. GAILLARD notre ingénieur imagina un montage permettant de faire fondre et de couler dans un ballon de verre à fond rond environ 11 kg de 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 (Figure 2). Il s'attaqua également à la réalisation du joint de cardan nécessaire à la fixation de la partie 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 supporte un autre, mobile sur 120° environ, dont la pointe également traitée vient «s'asseoir» sur le siège conique précédent (Figure 3).

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 m 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 châtaigners parfois immenses, et chef-d'œuvre de l'art des charpentiers du XVII^{ème} siècle...

3. MESURES

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

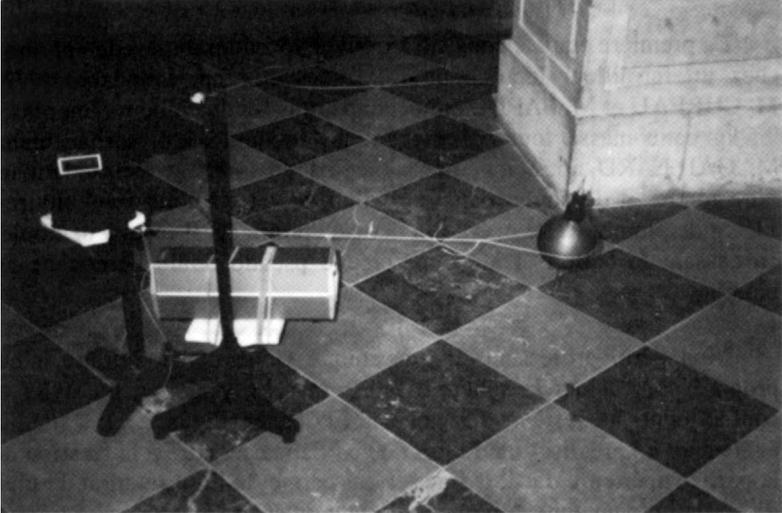


Figure 4 : La sphère en position de départ. A gauche le laser d'alignement.

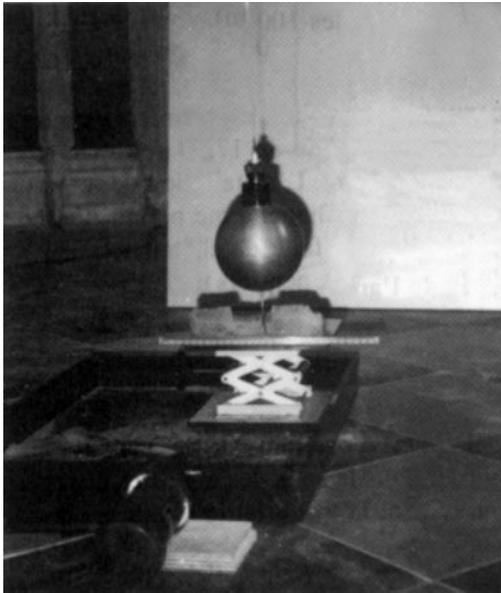


Figure 5 : Le pendule ronge le tas de sable. On remarque l'éclairage pour porter une ombre agrandie sur l'écran.

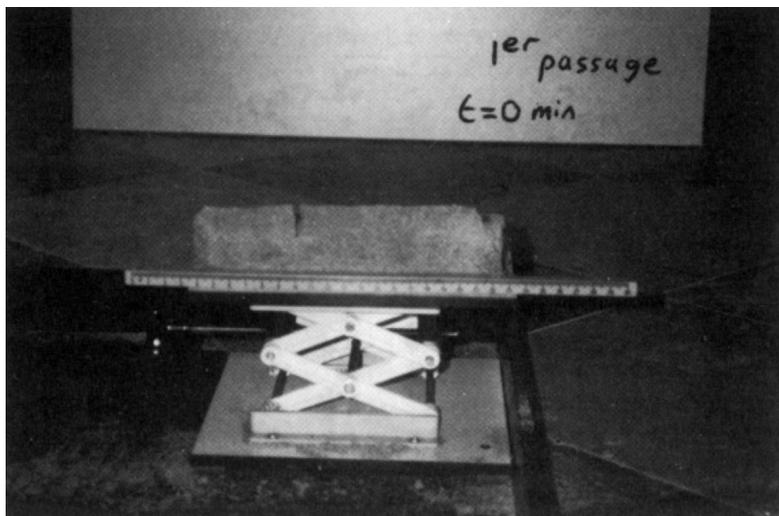


Figure 6

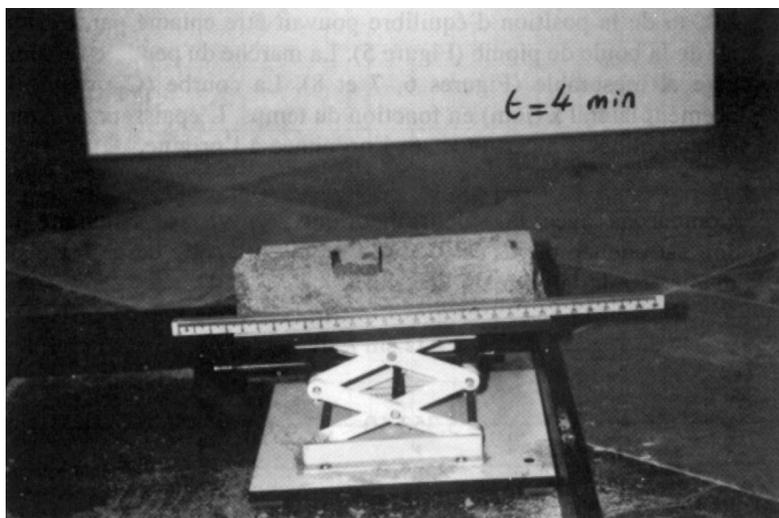


Figure 7

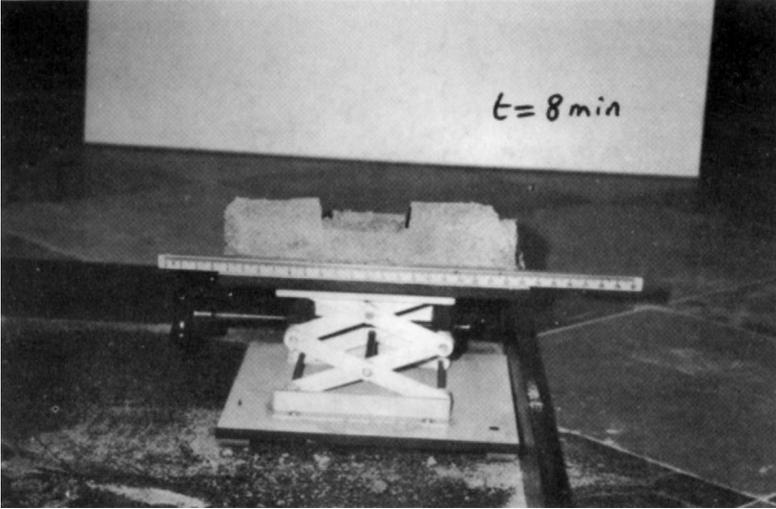


Figure 8

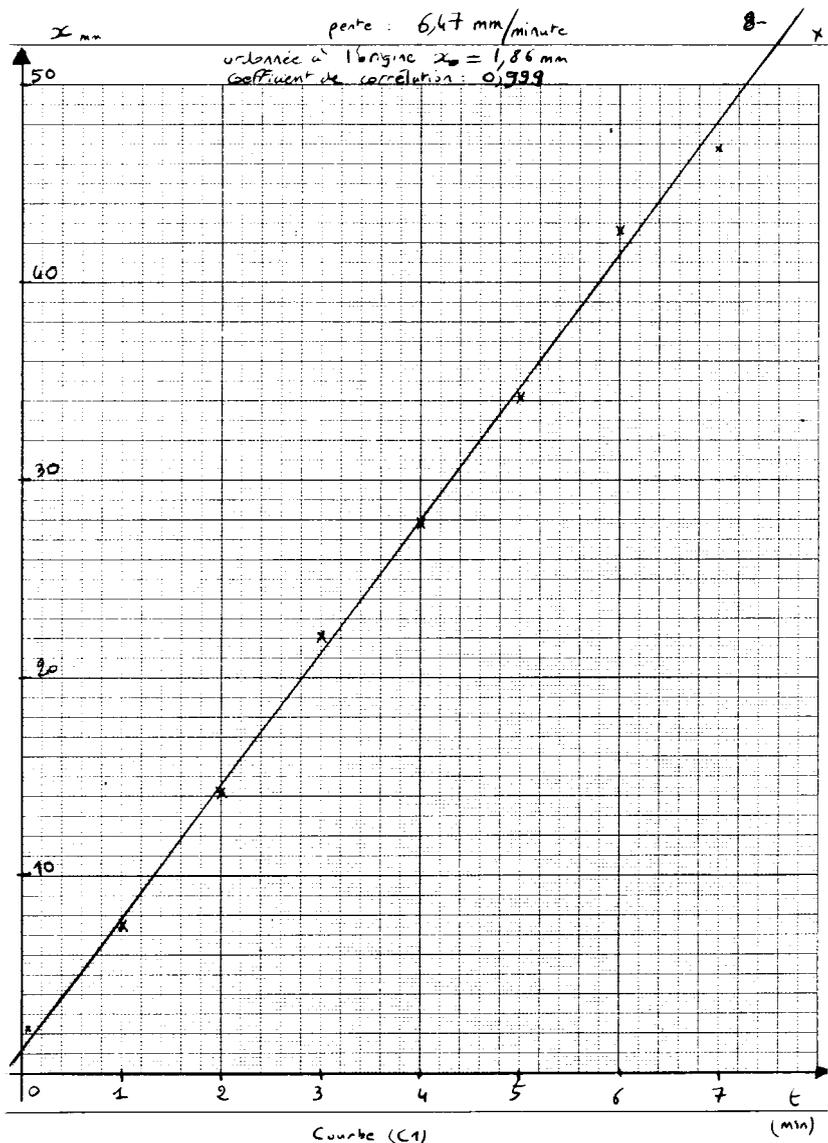
La masse était lâchée sans vitesse initiale, par destruction à la flamme, d'un fil retenant le pendule à 2,50 m de sa position d'équilibre (Figure 4). La direction initiale de marche était repérée par un faisceau laser passant par la corde à piano à l'équilibre et le stylet inférieur en position de départ. 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 (Figure 5). La marche du pendule fut alors évidente et mesurable (Figures 6, 7 et 8). La courbe (C_1) donne le déplacement latéral x (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 est donnée par $\Omega \sin \lambda$ où Ω représente celle de la Terre sur elle même et λ la latitude du lieu. Ici $\lambda = 47^\circ 42' 4''$:

$$x = \Omega \sin \lambda dt$$

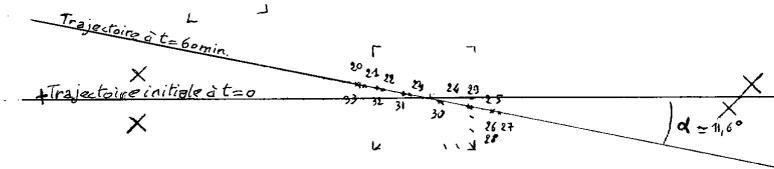
$$x_{(m)} = 5,353 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot t_{(s)}$$

$$\left(\frac{x}{t} \right)_{\text{théorique}} \sim 6,472 \text{ mm par min}$$



L'écart avec la pratique est de l'ordre de grandeur de l'incertitude

donc satisfaisant : $\frac{\left(\frac{x}{t}\right)_{\text{pratique}}}{\sim 6,47 \text{ mm par min}}$ à 4 % près environ.



- graphique C2 -^x

X

Mais sur une durée plus grande le pendule marchait-il régulièrement ? Pour le savoir, une série de clichés ont été réalisés 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, à 18 m au dessus du sol. 60 minutes (± 10 secondes) après le lâcher, l'angle formé par la direction initiale et celle du mouvement était de $\alpha_{\text{pratique}} = 11,6^\circ \pm 0,1$ (graphique 2) or la formule précédente prévoit :

$$\alpha_{\text{théorique}} = \Omega \sin \lambda t$$

$$\alpha_{\text{th}} = \frac{5,393 \cdot 10^{-5} \times 3600 \times 180}{\pi}$$

$$\alpha_{\text{théorique}} \sim 11,12^\circ \text{ par heure}$$

L'écart est donc de 4,5 % ce qui est tout à fait raisonnable compte tenu des incertitudes de mesures. 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'approximations 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 $h/l = 0,175 / 17,56 \sim 1,01\%$ au maximum. Notons que la longueur l peut être déterminée par la mesure de la période des oscillations ici $T_{0\text{pratique}} \sim 8,410\text{s}$ au lieu des $8,406\text{s}$ prévues par la théorie du pendule simple pour $l = 17,56\text{ m}$ soit une erreur de l'ordre du centimètre. Bouasse dans «gyroscopes et projectiles» chez Delagrave donne la condition $\frac{3}{8} \frac{a^2}{l^2} \leq 10^{-2}$ où a est l'amplitude soit $a \leq 2,86\text{ m}$, 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 divisé par deux en 33 min (± 2 min) 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 10 kg.

Enfin, abordons l'ellipticité du mouvement qui apparaissait parfois assez nettement à l'œil mais que la photographie «aérienne» n'a pu mettre en évidence par manque de précision. Une série de clichés pris 5 minutes après le lâcher a montré que l'ellipticité, petit axe Y_0 sur un grand axe X_0 , était inférieure à $1,8 \cdot 10^{-3}$. Or la théorie indique que $\frac{Y_0}{X_0} = \frac{\Omega \sin \lambda}{2\pi/T_0} = 7,21 \cdot 10^{-5}$ 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'oscillations suivant 2 axes orthogonaux elles n'ont pas été mises en évidence.

4. PRÉSENTATION AU PUBLIC

Présentée pendant 15 jours sur rendez-vous et durant un week-end complet par une équipe de 5 personnes (Messieurs BARON, COSNARD, GUIFFARD, LE FUR et RABALLAND), cette expérience «historique» fut observée par plus de 4 000 personnes dont 2 000 scolaires (du CM1 à la Math. Spé) en septembre 90.



Figure 9 : L'ensemble de l'expérience.

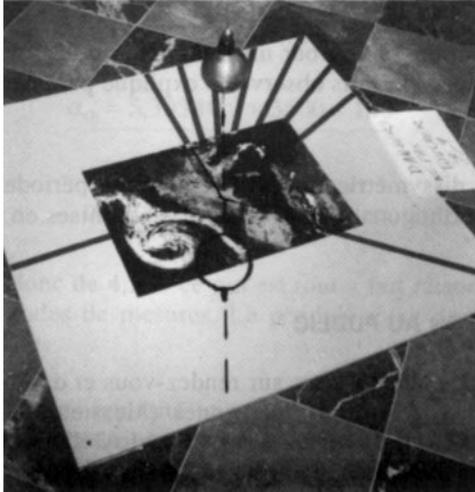


Figure 10 : Une oscillation du pendule 2 h 15 après le lancement.

L'observation de l'avance du plan d'oscillations se faisait par projection en ombre chinoise du tas de sable humide qui était rongé en 7 à 8 min par le stylet du pendule. Le public pouvait revenir en 1 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 1 H d'expérience (Figures 9 et 10)

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 ou 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 pas 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 doit constituer un hommage à ce grand scientifique expérimentateur dont les inventions marquent encore notre siècle : le pendule inspira à Léon Foucault le gyroscope qui équipe tant d'avions et de fusées.

Avec la participation active de MM. AUBERT, CLEROUX et MENARD.

BIBLIOGRAPHIE

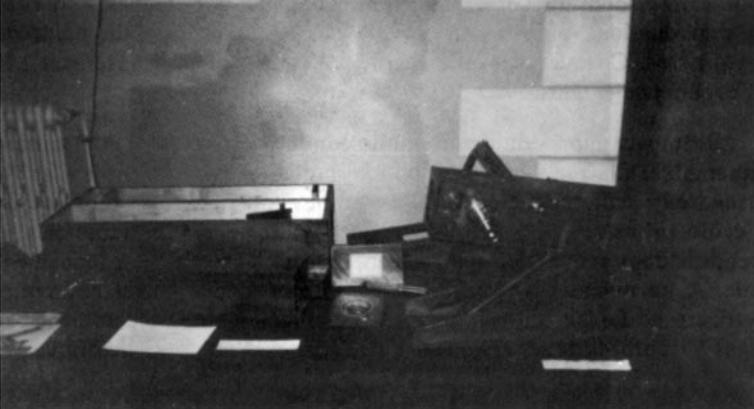
Foucault et ses pendules - S. DELIGEORGES chez Carré.

Astronomie Populaire d'Arago - Tome 3 - Paris 1856.

Bulletin de l'Union des Physiciens - n° 652 - Mars 83.

Gyroscopes et Projectiles - H. BOUASSE - Delagrave 1923.

Le pendule du Panthéon - C. Flammarion - Revue scientifique
1^{er}/11/1902.



Télescopes en bois à miroirs de verre signé L. Foucault
réalisation Secrétan vers 1860 (collection Prytanée N.M.).



De gauche à droite :

- héliostat signé Duboscq collaborateur de Foucault,
- héliostat de Sgravesarde construit par Fortin inventeur d'un baromètre,
- télescope métallique de Foucault - Secrétan 1866,
- boîte du photomètre de Foucault.