Ce qui fait tourner le pendule de Foucault par rapport aux étoiles

Norman Phillips
Merrimack, New Hampshire
ÉTATS-UNIS
Courrier électronique : NapMar18@aol.com

Résumé

La démonstration du pendule de Foucault en 1851 s'est tenue à une période qui est actuellement connue comme celle du développement des théorèmes de Coriolis et de la formulation de la météorologie dynamique par Ferrel. Cependant, aujourd'hui encore, le comportement de ce pendule est souvent mal interprété. Pour comprendre le mouvement du pendule par rapport aux étoiles, il est essentiel de prendre conscience de l'existence d'une composante horizontale de l'attraction newtonienne. Deux principes simples de la mécanique expliquent pourquoi le plan des oscillations n'est fixe qu'aux pôles : le principe de l'accélération centrifuge et le principe de conservation du moment cinétique. Une carte du ciel est utilisée pour montrer l'élégante trajectoire par rapport aux étoiles qui résulte de ces deux principes.

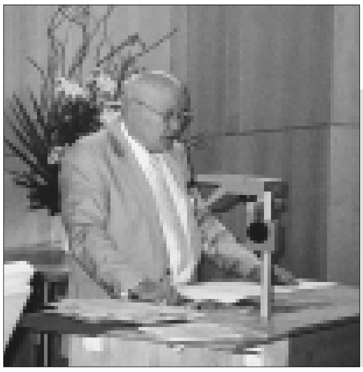
Abstract

What makes the Foucault pendulum move among the stars?

Foucault's pendulum exhibition in 1851 occurred in an era now known by development of the theorems of Coriolis and the formulation of dynamical meteorology by Ferrel. Yet today the behavior of pendulum is often misunderstood. The existence of a horizontal component of Newtonian gravitation is essential for understanding the behavior with respect to the stars. Two simple mechanical principles describe why the path of oscillation is fixed only at the poles: the principle of centripetal acceleration and the principle of conservation of angular momentum. A sky map is used to describe the elegant path among the stars produced by these principles.

Le 26 mars 1851, il y a cent cinquante ans, le Panthéon était le siège d'une démonstration extraordinaire par Léon Foucault de son pendule de 67 mètres. La lente précession dans le sens des aiguilles d'une montre de la trajectoire des oscillations stupéfia l'assistance et la nouvelle fit rapidement le tour du monde. Des pendules furent immédiatement installés sur tous les continents. Pour la première fois, il était possible d'être témoin de la rotation de la Terre dans une pièce fermée. Il n'était plus raisonnable de penser que le Soleil et les étoiles tournaient autour de la Terre ; l'évidence de la rotation de la Terre était trop forte (Deligeorges, 1990). Cela se passait au moment où la météorologie commençait à être considérée comme une branche de la mécanique (Ferrel, 1859).

Norman Phillips en mars 2000 à Potsdam, lors du symposium célébrant le cinquantième anniversaire de la prévision numérique du temps. (Photo J.-P. Javelle)



Norman Phillips

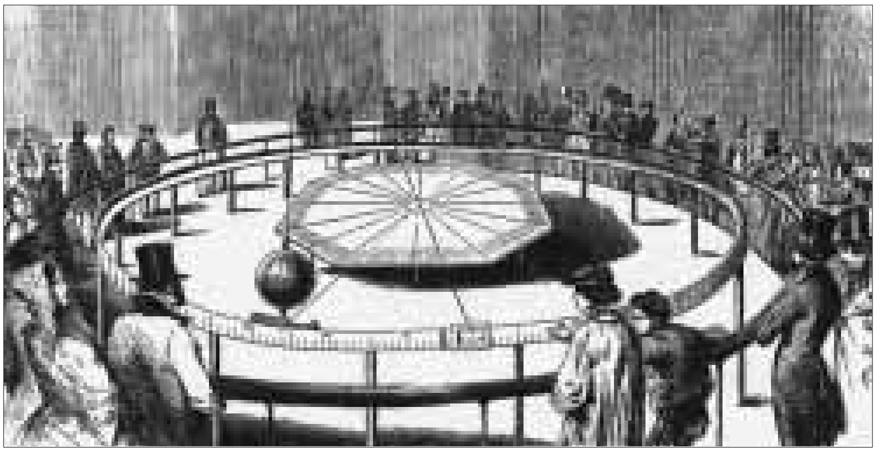
Depuis les débuts de la prévision numérique du temps, Norman Phillips est un acteur important de cette discipline. En particulier, il participe en 1951 à la deuxième expérience de prévision sur l'Eniac. En 1955, alors qu'il travaille à l'Institute for Advanced Studies à Princeton avec Jule Charney et John von Neumann, il est l'auteur de la première simulation de la circulation générale de l'atmosphère, ouvrant ainsi la voie à la simulation du climat. (Ndlr)

Léon Foucault (1819-1868). On trouvera dans ce numéro (p. 68) une note de lecture, rédigée par Gérard De Moor, sur l'ouvrage *Foucault et ses pendules,* dans lequel Stéphane Deligeorges retrace la carrière et les travaux scientifiques de ce physicien atypique dont les inventions ont marqué son époque dans des domaines très variés. (© Musée des arts et métiers, inv. 16738)

Foucault était un physicien expérimentateur extraordinaire qui, outre le pendule et le gyroscope, fit des découvertes majeures en optique. Cependant, dans son rapport à l'Académie des sciences, il s'abstint de présenter une explication mathématique de la précession du pendule (Foucault, 1851). Il suggéra cependant que la période de cette précession était inversement proportionnelle au sinus de la latitude selon la formule :
Période de précession = 24 heures sidérales[1] divisé par le sinus de la latitude (1)

D'autres se sont immédiatement précipités pour remplir ce vide mathématique et les années qui suivirent ont vu paraître de nombreux articles dans la littérature scientifique pour essayer d'expliquer le phénomène. La proportionnalité inverse au sinus de la latitude est maintenant enseignée aux étudiants en mécanique, en utilisant les théorèmes de Coriolis (1835). Le développement du calcul vectoriel par Heaviside et Gibbs rendit aussi plus facile l'explication mathématique des effets de la rotation de la Terre ; son explication classique, dans un système de coordonnées en rotation, a été donnée par Sommerfeld (1965).

Bien que la physique de la précession vue de la Terre soit simple – au moins quand on a compris la force de Coriolis ! – sa physique vue dans un espace non tournant semble avoir été plutôt déroutante. Foucault lui-même semble avoir pensé que, d'une certaine façon, le plan de la précession était fixe par rapport aux étoiles, ce qui est vrai aux pôles mais pas ailleurs. Cet article est une tentative pour décrire les forces qui engendrent la précession, en évitant les développements mathématiques et en utilisant seulement les principes physiques les plus simples. Nous espérons qu'il sera compréhensible aussi bien aux amateurs qui visitent les musées qu'aux scientifiques. Une explication moins détaillée a été donnée récemment par Marillier (1998).



L'expérience du pendule de Foucault au Panthéon en 1851. Reproduction d'une gravure parue dans *l'Illustration* en 1851. (Document Météo-France)

Il se déplace par rapport aux étoiles

Considérons l'exemple du pendule du Panthéon. Le sinus de la latitude de Paris est proche de 0,75 et, d'après la formule de Foucault, 32 heures sidérales sont nécessaires pour une rotation complète. Ainsi, le plan des oscillations a tourné de trois quarts de tour au bout de 24 heures et il est donc orienté perpendiculairement à sa position initiale dans le Panthéon. Mais comme le Panthéon a retrouvé la même orientation par rapport aux étoiles que 24 heures (sidérales) plus tôt, le plan des oscillations est aussi perpendiculaire à celui des oscillations initiales quand on le regarde des étoiles. En dépit de cette explication directe, qui mérite le nom d'observation, il est encore courant de trouver des musées – et leurs sites Web – où l'on soutient que la trajectoire du pendule est fixe dans l'espace.

(1) Le **jour solaire** est l'intervalle de temps entre deux passages successifs du Soleil au-dessus du même méridien. Le **jour sidéral** est le temps nécessaire pour qu'une étoile lointaine fasse la même chose. L'écart relatif entre ces deux durées, qui est d'environ 1/365, tient au fait que la Terre tourne autour du Soleil. Le jour sidéral est constant, alors que le jour solaire ne l'est pas du fait de l'ellipticité de l'orbite terrestre. La notion de jour sidéral est classique, celle d'**heure sidérale** l'est moins. (Note du traducteur)

Référentiel galiléen et référentiel terrestre

Les lois de la mécanique ne prennent une forme simple (notamment la proportionnalité entre force et accélération) que dans des référentiels particuliers, dits absolus ou **galiléens** ; en pratique, tout système d'axes lié aux « étoiles fixes » peut être considéré comme un référentiel galiléen, et tout référentiel en mouvement de translation uniforme par rapport à un référentiel galiléen est lui-même galiléen. Il n'en va pas de même pour un référentiel qui possède une forme quelconque d'accélération, comme c'est le cas des systèmes d'axes liés à la sphère terrestre. Or, pour décrire les mouvements qui se produisent sur notre planète, il est commode d'utiliser un repère dans lequel la Terre est immobile. On définit ainsi un **référentiel terrestre**, lié au centre de gravité de la Terre, à son axe de rotation et à un point fixe de la Terre. Dans un tel système, les lois de la mécanique ne conservent leur forme galiléenne qu'à la condition d'introduire des forces d'inertie liées au mouvement de la Terre, la force centrifuge et la force de Coriolis. (Ndlr)

Le pendule utilisé lors de l'Exposition universelle de 1855 à Paris et qui est actuellement présenté dans la chapelle du musée des Arts et Métiers. La rotation du plan du pendule en vingt-quatre heures est repérée par des graduations sur le plateau. (© Musée des arts et métiers, photo J.-C. Wetzel, inv. 8042)

Ce malentendu semble fondé sur l'idée qu'il n'existe aucune force horizontale qui puisse exercer un couple pour faire changer le plan de ces oscillations par rapport à l'espace ; la force de rappel des oscillations du pendule est, en effet, toujours dirigée vers l'axe d'équilibre du pendule. Mais il existe aussi une autre force qui agit, une force qui simplifie grandement notre vie de tous les jours, bien qu'elle ne soit ressentie par aucun d'entre nous.

Le pendule au repos

Pour examiner les forces qui agissent sur le pendule, il est essentiel de considérer d'abord la situation la plus simple, celle où il est au repos. Le pendule se comporte alors comme un simple fil à plomb qui définit la verticale locale. Il se déplace aussi d'ouest en est avec la Terre. Qu'est-ce qui fait que le pendule au repos se déplace le long de ce cercle ? Ce ne peut pas être la tension du fil puisqu'elle agit seulement verticalement vers le haut le long du fil – elle n'entraîne pas le plomb autour de la Terre (et si l'on coupait le fil, le plomb continuerait à tourner avec la Terre). Le phénomène est le même que lorsqu'on fait tourner une pierre attachée à une corde, par exemple dans une fronde en mouvement horizontal ; il est nécessaire de tirer sur la corde pour que la pierre

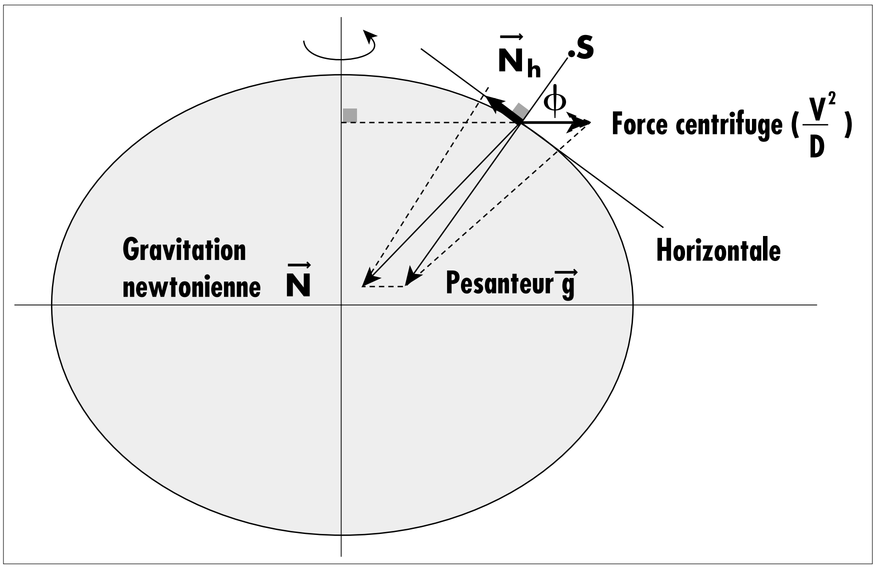


Figure 1 - Forces agissant sur un pendule au repos suspendu en S, vu dans un plan méridien. La force de gravitation newtonienne $\vec{N}$ est dirigée vers le centre de la Terre. La pesanteur (ou gravité) $\vec{g}$ a une direction verticale, celle du fil qui soutient le plomb. Elle est égale à la somme vectorielle de la force de gravitation $\vec{N}$ et de la force centrifuge de module V^2/D où D désigne la distance à l'axe de rotation de la Terre et V la composante vers l'est de la vitesse d'un point de la surface de la Terre. L'attraction newtonienne $\vec{N}$ a une composante horizontale $\vec{N}_h$ dirigée vers le pôle. ϕ représente la latitude. Le dessin exagère la forme ellipsoïdale de la Terre et la taille du pendule.

décrive un cercle au lieu d'aller tout droit. Il doit donc exister une force similaire qui agit sur le plomb du pendule au repos. Cette force $\vec{N}_h$ est une composante de la force de gravitation (attraction newtonienne) $\vec{N}$; $\vec{N}_h$ est parallèle à la surface de la Terre et dirigée vers le pôle. La figure 1 illustre la façon dont cette force $\vec{N}_h$ agit sur le plomb du pendule au repos, alors que la figure 2 montre comment la force $\vec{N}_h$ accélère vers le pôle le plomb du pendule au repos pour lui faire décrire un cercle.

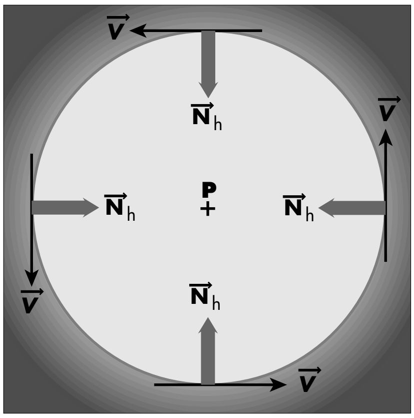


Figure 2 - La composante horizontale $\vec{N}_h$ de l'attraction newtonienne agit de façon à accélérer le plomb qui décrit un cercle dans sa rotation avec la Terre. La vue est celle d'un observateur galiléen immobile au-dessus du pôle P.

Il n'y a pas que le pendule qui subit $\vec{N}_h$; si $\vec{N}_h$ n'existait pas, les océans accéléreraient vers l'équateur au lieu de tourner avec la Terre. C'est la forme ellipsoïdale de la Terre, que Newton a le premier imaginée, qui fait que l'attraction newtonienne possède une composante horizontale dirigée vers le pôle juste suffisante pour maintenir les océans, l'atmosphère, etc. à leur place. Et, bien sûr, elle nous maintient à la latitude à laquelle nous avons décidé de vivre. Quelle est l'amplitude de cette force ?

La familière force centrifuge dirigée vers l'extérieur a une amplitude qui est égale à la masse m du plomb multipliée par le carré de la vitesse vers l'est (V) et divisée par la distance à l'axe de rotation de la Terre (D) :

force centrifuge = $m.V^2 / D$ (2)

Pour un corps immobile par rapport à la Terre, V est égale à la distance D multipliée par la vitesse angulaire de rotation de la Terre. Comme aux latitudes moyennes D vaut environ 4 000 km, V est de l'ordre de 1 000 km/h ou 280 m/s. Pour un plomb de 1 kilogramme, cette force vaut donc 0,02 newton (le kilogramme « pèse » 10 newtons). De cette façon, nous avons calculé la force centrifuge totale, dirigée perpendiculairement à l'axe de rotation de la Terre, comme montré sur la figure 1. Mais $\vec{N}_h$ doit équilibrer la partie de cette force qui agit dans le plan horizontal, puisque sa composante verticale est déjà contenue dans la pesanteur. Cette estimation doit donc être multipliée par le sinus de la latitude pour obtenir sa composante horizontale, ce qui, pour les latitudes moyennes, conduit à une valeur de 0,015 newtons pour $\vec{N}_h$ (on notera que $\vec{N}_h$ est nulle à l'équateur).

$\vec{N}_h$ existe aussi lorsque le pendule oscille. Nous avons donc déjà trouvé un fait majeur : il y a une force réelle qui agit sur le plomb, qui ne participe ni à la tension du fil ni à la pesanteur ordinaire dirigée verticalement. Ce fait fondamental est parfois oublié (Somerville, 1972, page 45 ; Hart et al., 1987, page 69). De plus, cette force n'agit pas seulement dans le plan des oscillations, elle est toujours dirigée vers le pôle. Cela nous libère de la croyance qu'il n'existe pas de force disponible pour changer l'orientation du mouvement du pendule par rapport aux étoiles. Mais nous allons voir que l'effet de $\vec{N}_h$ sur le pendule est subtil et indirect.

Quelle est l'amplitude de la force qui fait osciller le pendule ? Si le plomb, qui est suspendu au bout d'un fil de longueur L, est écarté de son point d'équilibre d'une distance x (petite devant L), il existe une composante de la pesanteur égale à la masse multipliée par le rapport x/L qui agit perpendiculairement au fil et qui accélère le plomb vers sa position d'équilibre. Avec L = 67 m, x = 3 m et un plomb de 1 kilogramme, nous trouvons une force de rappel d'amplitude égale à 0,5 newton. L'amplitude de la force de rappel est donc 33 fois plus grande que celle de $\vec{N}_h$ (la période des oscillations du pendule est de 16,4 secondes).

Il nous faut maintenant trouver comment la force $\vec{N}_h$, qui est toujours dirigée vers le pôle, agit pour faire tourner la trajectoire des oscillations dans le sens des aiguilles d'une montre. Pour cela, nous allons examiner comment $\vec{N}_h$ agit dans deux situations différentes : la première quand le pendule oscille d'ouest en est et la seconde quand il oscille du sud vers le nord.

L'évolution de l'équilibre centrifuge

Pour concentrer notre attention sur $\vec{N}_h$, nous allons ignorer la force de rappel du pendule dans un premier temps. Considérons le plomb quand il se déplace d'ouest en est avec la vitesse v, observée à partir de la Terre ; sa vitesse totale vers l'est est donc $V_t = V + v$, plus grande que V. Pour qu'il continue à se déplacer sur le même cercle de latitude que son point d'équilibre, il faudrait qu'une force dirigée vers le pôle, plus grande que $\vec{N}_h$ d'après l'équation (2), lui soit appliquée. Comme une telle force n'existe pas, le plomb ne suivra pas la ligne de latitude constante, mais accélérera vers l'équateur pour suivre une trajectoire un peu moins courbe. Quand le plomb retourne d'est en ouest à la vitesse v, sa

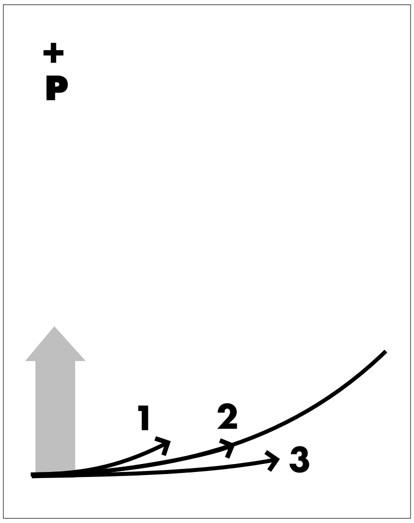


Figure 3 - Pour un observateur galiléen immobile au-dessus du pôle, un corps se déplaçant vers l'est à la même vitesse que la surface de la Terre suivra la trajectoire 2. Un corps se déplaçant vers l'est plus lentement (c'est-à-dire vers l'ouest par rapport à la Terre) accélérera vers le nord, selon la trajectoire 1. Un corps se déplaçant plus rapidement vers l'est accélérera vers le sud sur la trajectoire 3.

vitesse totale sera $V_t = V - v$ et la force $\vec{N}_h$ sera plus grande que celle nécessaire à le maintenir sur le même cercle de latitude ; il accélérera donc vers le pôle. Ces déplacements sont représentés sur la figure 3.

Dans les deux cas, on voit que la trajectoire du plomb est déviée vers la droite, ainsi qu'on l'observe pour le pendule de Foucault. La force de rappel plus forte exercée par le fil du pendule ne supprimera pas complètement cet effet, mais elle agira contre la déviation du plomb et réduira la précession dans le sens des aiguilles d'une montre (un calcul mathématique montre qu'elle divise par deux la vitesse de rotation donnée par le raisonnement précédent).

Pesanteur et forme de la Terre

Pour une planète en rotation, la pesanteur effective en un point donné est en fait la somme vectorielle de l'attraction newtonienne (dirigée et orientée vers le centre de la planète) et de la force centrifuge, perpendiculaire à l'axe de rotation. Si la Terre était sphérique, les verticales (normales à la surface) passeraient toutes par son centre, l'attraction newtonienne serait verticale, mais la pesanteur en tout point aurait une composante parallèle à la surface de la Terre, dirigée et orientée vers l'équateur. En réalité, la Terre a adapté sa forme de façon à ce que la pesanteur soit normale à sa surface en tout point de cette surface (forme ellipsoïdale avec un rayon polaire inférieur d'une vingtaine de kilomètres au rayon équatorial). La verticale ne passe donc plus par le centre qu'aux pôles et à l'équateur, la pesanteur est verticale ; mais, en contrepartie, l'attraction newtonienne ne l'est plus : elle a une composante horizontale dirigée et orientée vers le pôle. C'est l'existence de cette composante qui permet à tout corps (comme l'eau de l'océan ou nous-mêmes), initialement au repos par rapport à la Terre et ne subissant l'influence d'aucune autre force, de ne pas se mettre à accélérer spontanément vers l'équateur ! (Ndlr)

La conservation du moment cinétique

Maintenant, intéressons-nous au cas où le plomb se déplace du sud vers le nord. Dans ce cas, la force $\vec{N}_h$ et la force de rappel du pendule sont toutes les deux dirigées le long du méridien et elles ne peuvent donc pas modifier le moment cinétique du plomb par rapport à l'axe de rotation de la Terre. Le moment cinétique M est le produit de la vitesse totale vers l'est par la distance à l'axe de rotation de la Terre D ($M = V_t.D$). La conservation du moment cinétique est, pour les mouvements de rotation et sous certaines hypothèses, une conséquence de la loi fondamentale de la dynamique. Elle explique pourquoi la vitesse de rotation d'une patineuse (l'équivalent de V_t) augmente quand elle replie les bras (l'équivalent de diminuer D). Quand le plomb se déplace vers le pôle, dans son oscillation du sud vers le nord, sa distance D à l'axe de rotation de la Terre décroît ; V_t doit donc augmenter pour que M reste constant. Ce processus est illustré par le déplacement 3 sur la figure 4. Cela signifie que la vitesse du plomb tend à acquérir une composante vers l'est par rapport à la Terre : le plomb ne se déplace donc pas suivant une trajectoire strictement sud-nord, mais il est dévié sur la droite. Quant au retour, le plomb se dirige vers le sud, la conservation de M fait décroître V_t, et il acquiert un mouvement vers l'ouest (déplacement 1 sur la figure 4). Dans les deux cas, le plomb est dévié vers la droite ; le calcul montre à nouveau que la force de rappel du fil réduit de moitié la déviation calculée à l'aide du raisonnement précédent.

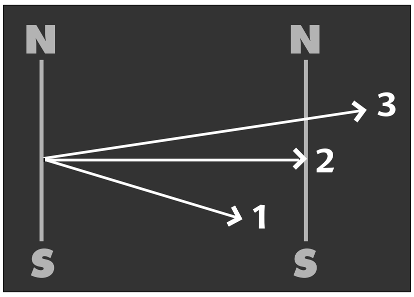


Figure 4 - Un corps se déplaçant vers l'est à la vitesse de la Terre suit la trajectoire 2 (un parallèle est représenté par une ligne droite). Un corps ayant la même vitesse que la Terre auquel on donne une vitesse vers le nord acquerra une vitesse supplémentaire vers l'est, comme montré en 3. Le même corps auquel on communique une vitesse vers le sud ralentira sa vitesse vers l'est et apparaîtra comme se déplaçant vers l'ouest par rapport à la Terre, comme en 1.

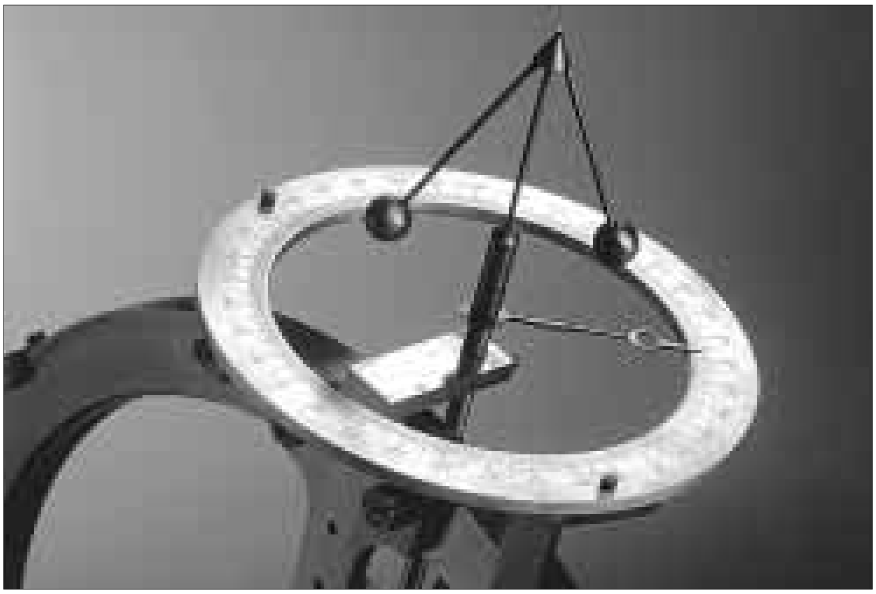
La discussion sur la conservation du moment cinétique, illustrée sur la figure 4, révèle un aspect remarquable du pendule de Foucault ; dans son mouvement de quelques mètres dans la direction nord-sud, le pendule « se rend compte » qu'il s'est rapproché ou éloigné de l'axe de rotation de la Terre, de 4 mètres dans l'expérience du Panthéon, alors même que 4 millions de mètres l'en séparent. Ainsi, il ajuste son mouvement vers l'est ou l'ouest afin de conserver son moment cinétique.

Nous pouvons conclure notre discussion des forces qui agissent sur le pendule en notant qu'à l'équateur la composante horizontale $\vec{N}_h$ de l'attraction newtonienne s'annule et que l'équilibre avec la force centrifuge a lieu dans le plan vertical. Un mouvement du pendule dans le sens ouest-est ne s'accompagne donc d'aucune accélération perpendiculaire au mouvement. De plus, un faible déplacement vers les pôles d'un pendule équatorial ne change pas sa distance à l'axe de rotation de la Terre ; la conservation du moment cinétique ne nécessite donc pas un changement de direction vers l'est ou l'ouest. À l'équateur, la précession est donc inexistante, comme l'avait intuitivement prévu Foucault.

La trajectoire dans le ciel

À quoi ressemble la trajectoire du pendule par rapport aux étoiles ? Comme on peut l'observer, le plomb atteint deux points extrêmes à chaque oscillation, où il arrête momentanément son mouvement. Nous considérerons seulement les positions extrêmes impaires, en partant du point de départ. Imaginons une courbe tracée du point d'équilibre qui joint les extrêmes atteints au bout de chaque période. La courbe tourne lentement dans le sens des aiguilles d'une montre, comme l'ont remarqué les observateurs au Panthéon en 1851. Pour représenter cette courbe, nous choisirons le point F du ciel situé à l'horizon dans la direction du pendule ; si le point de départ est situé au nord du point d'équilibre, le point F dans le ciel est situé sur l'étoile qui est sur l'horizon, au nord du point d'équilibre.

Comment le point F se déplace-t-il dans le ciel ? Le mouvement du pendule est la composition de deux rotations quand on l'observe de l'espace :
– une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre par rapport au Panthéon autour de son axe vertical, dont la période est donnée par la formule de Foucault ;
– une rotation plus rapide dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, car le Panthéon tourne avec la Terre avec une période de 24 heures.



Appareil de Silvester servant à démontrer les propriétés du pendule sous diverses latitudes. (© Musée des arts et métiers, photo J.-C. Wetzel, inv. 8044)

Peu après la démonstration de Foucault, E. Silvester (1851) a construit un appareil[(1)] qui montre mécaniquement comment ces deux rotations se composent. Actuellement, il est facile de calculer le mouvement résultant sur une carte du ciel à l'aide d'un ordinateur personnel. Les résultats de ces calculs sont montrés sur la figure 5 pour un pendule situé à 48,6 degrés de latitude nord. Dans cet exemple, le pendule a été lâché du repos au nord de son point d'équilibre, de sorte que la position initiale de F est celle de l'étoile située dans cette direction à 41,4 degrés de latitude dans le ciel. Le sens de rotation de F est la direction inverse des aiguilles d'une montre, celui de la seconde rotation, qui est la plus rapide. F commence à tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en direction de l'équateur sur la carte du ciel. À 16 heures, il est sur l'horizon vers le sud et arrête son mouvement à 41,4 degrés de latitude sud ; il arrêtera aussi son mouvement de rotation car, momentanément, les deux rotations se compensent et il s'ensuit un point de rebroussement. F inverse son mouvement et retourne dans le ciel de l'hémisphère nord. À 32 heures, il est remonté au nord aussi haut qu'il était parti. Il fait alors à nouveau une halte momentanée et reproduit la même trajectoire que précédemment, mais à des longitudes différentes.

(1) Le professeur William Tobin a attiré mon attention sur cet appareil (inventaire CNAM n° 8044), du fait de sa grande connaissance du travail de Foucault. Il est certain qu'un tel appareil était utile quand les théorèmes de Coriolis n'étaient pas encore largement connus et que l'analyse vectorielle n'était pas encore inventée.

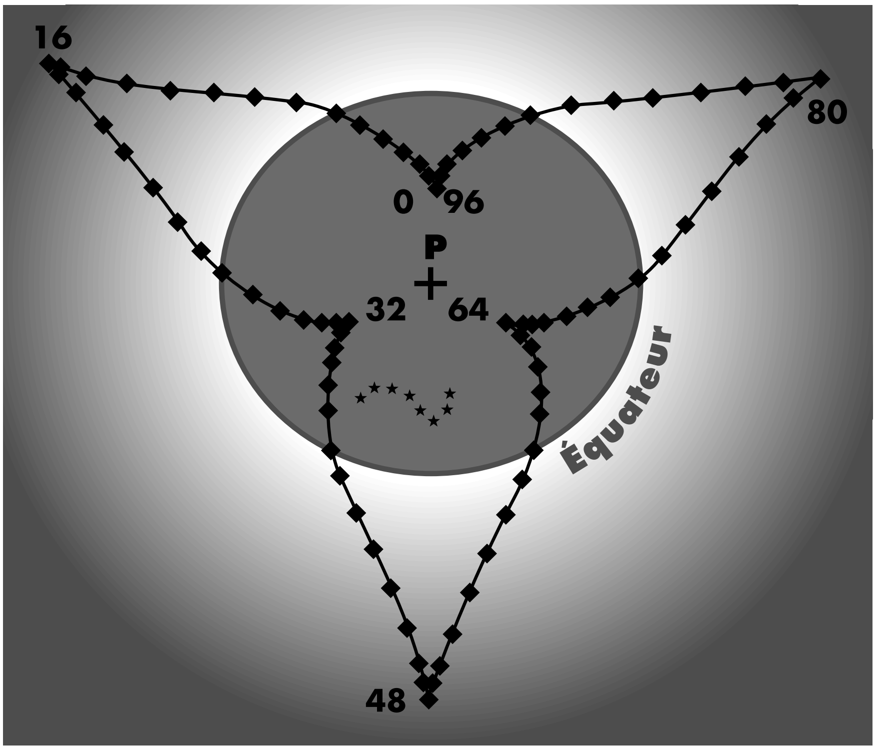


Figure 5 - Carte du ciel montrant le pôle nord (P) et l'équateur (cercle). Les étoiles de l'hémisphère austral sont situées à l'extérieur du cercle (le pôle sud est situé à l'infini sur cette carte). La rotation du plan du pendule est représentée par la trajectoire du point F du ciel situé à l'horizon dans la direction du pendule. La trajectoire du point F durant 96 heures est représentée pour un pendule situé à 48,6 degrés de latitude nord (latitude de Paris). Le point de départ est situé au nord du point d'équilibre et la période de précession est de 32 heures. Un point de rebroussement a lieu toutes les 16 heures quand la trajectoire atteint un extremum à 41,4 degrés de latitude nord ou sud sur la carte du ciel. La Grande Ourse est indiquée seulement de façon schématique.

La latitude 48,6° est telle que trois périodes de précession du pendule (96 heures sidérales) ont la même durée que quatre jours sidéraux. Donc, la trajectoire de F sur la carte du ciel se répète toutes les 96 heures, puisque aussi bien le pendule que la Terre retrouvent leurs orientations initiales tous les quatre jours.

Traduit de l'anglais par Michel Rochas

Remerciements

Je remercie Anders Persson pour les copies des documents originaux, le professeur William Tobin pour de fructueux échanges d'informations, Jean-Pierre Javelle pour son aide dans la préparation de ce travail et Michel Rochas pour sa traduction en français.

Bibliographie

Coriolis G., 1835 : Mémoire sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps. *Journal de l'École polytechnique*, 15, 142-154.

Deligeorges S., 1990 : *Foucault et ses pendules*. Éditions Carré, Paris, réédition 1995, 112 p.

Ferrel W., 1859 : The motion of fluids and solids relative to the earth's surface. *Mathematical Monthly*, 1, 140-147, 210-216, 300-307, 366-372, 397-406.

Foucault L., 1851 : Démonstration physique du mouvement de rotation de la Terre au moyen du pendule. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 32, 135-138.

Hart J., R. Miller et **R. Mills,** 1987 : A simple model for visualizing the motion of the Foucault pendulum. *American Journal of Physics*, 55, 67-70.

Marillier A., 1998 : L'expérience du pendule de Foucault au palais de la Découverte. *Revue du palais de la Découverte*, 258, 33-45.

Silvester E., 1851 : Appareil donnant directement le rapport qui existe entre la vitesse angulaire de la Terre et celle d'un horizon quelconque autour de la verticale du lieu. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 33, 40-41.

Somerville W., 1972 : The description of Foucault's pendulum. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 13, 40-62.

Sommerfeld A., 1965 : *Lectures on theoretical physics*. Vol 1: Mechanics. Academic Press, New York, États-Unis.