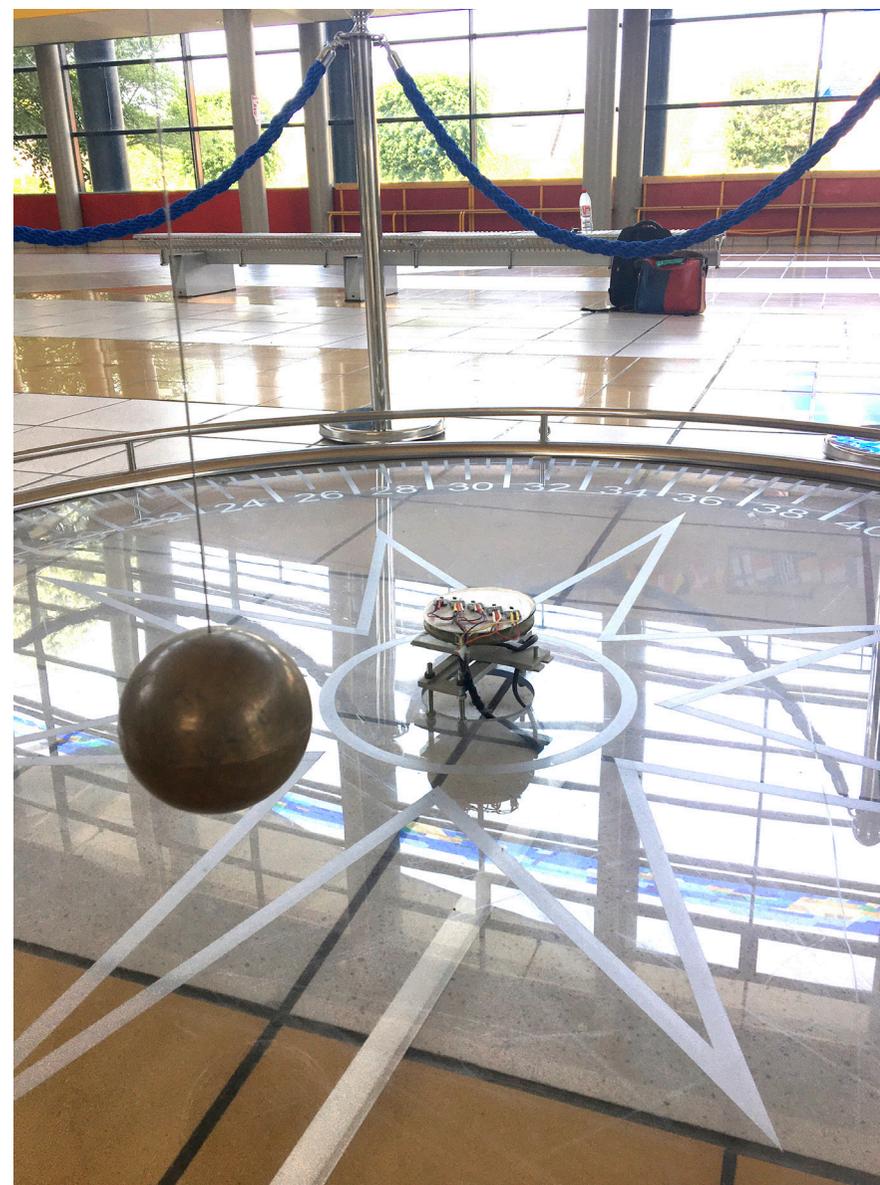


Un pendule de Foucault en région Centre-Val de Loire

Un dispositif expérimental historique itinérant à destination des lycées et établissements d'enseignement supérieur pour découvrir la rotation de la Terre.

Le pendule de Foucault a été réalisé en partenariat avec les Ingénieurs de Touraine, le CNAM de Tours, les lycées Grandmont et Descartes, le Collège Rabelais, le CEA, les entreprises Jourdain et BFC et Centre•Sciences avec le soutien de la mairie de Tours.

Une itinérance réalisée avec le soutien de la Région Centre-Val de Loire et le Fonds européen Feder.



Pendule de Foucault

Au 19^e siècle, nul ne doutait de la rotation de la Terre mais, en dehors de l'observation du mouvement apparent des étoiles, personne n'avait pu mettre en évidence ce phénomène simple. Certains savants pensaient même qu'il était impossible de montrer cette rotation avec une expérience uniquement terrestre.

C'est en janvier 1851, que Jean Bernard Léon Foucault monte dans sa cave sa première expérience. Pour cela, il utilise un fil métallique de deux mètres de long supportant un lourd poids de fonte. Il met en évidence un mouvement infime. Un mois plus tard, Foucault peut installer son expérience devant les Académiciens.

Le 3 février 1851, certains reçoivent une invitation ainsi libellée : « Vous êtes invités à venir voir tourner la Terre dans la salle méridienne de l'Observatoire de Paris ».

Louis Bonaparte autorise l'installation de l'expérience au Panthéon au mois de mars ce qui permet aux Parisiens de venir assister en masse à cette majestueuse expérience. Dans cette nouvelle disposition, la longueur du fil d'acier est de soixante-sept mètres, le globe très dense, d'un diamètre de dix-huit centimètres a une masse de vingt-huit kilogrammes.

Le 31 mars, le pendule a été mis en branle : « Après une oscillation double de 16 secondes de durée, écrit Foucault, on l'a vu revenir à 2 millimètres et demi environ à gauche du point de départ. Le même effet continuant à se produire à chaque oscillation, la déviation a été grandissant toujours plus, proportionnellement au temps ».

Cette découverte scientifique connaît un tel succès public que, l'expérience est reproduite à New York, Rome, Bristol, Dublin, Londres, Ceylan, Rio de Janeiro... et aujourd'hui c'est désormais possible dans votre établissement en région Centre-Val de Loire.



Le dispositif

Le pendule de Foucault est constitué d'une platine supérieure en acier (anneau de Charon) sur laquelle est fixé un dispositif pouvant osciller librement.

Un câble d'acier relie ce dispositif à une sphère en laiton de 12,5 cm de diamètre et 8,5 kg.

La longueur du câble d'acier est adapté en fonction de la hauteur sous plafond.

Une rosace constituée d'un anneau en inox et plateau en polycarbonate de 2,2 m de diamètre est placé au sol à la vertical du pendule pour repérer les oscillations du pendule.

Un dispositif électronique est placé au centre de la rosace pour entretenir le mouvement du pendule.



La sphère du pendule a été conçue et étudiée à l'aide d'un logiciel de Conception & Fabrication Assistée par Ordinateur. C'est le premier maillon de la chaîne numérique. Pour l'obtention des 2 hémisphères, le procédé « Tournage à Commandes Numériques (CN) 2 axes » a été utilisé. Il permet, par enlèvement de copeaux de matière (ici du laiton), d'usiner des pièces de révolution.



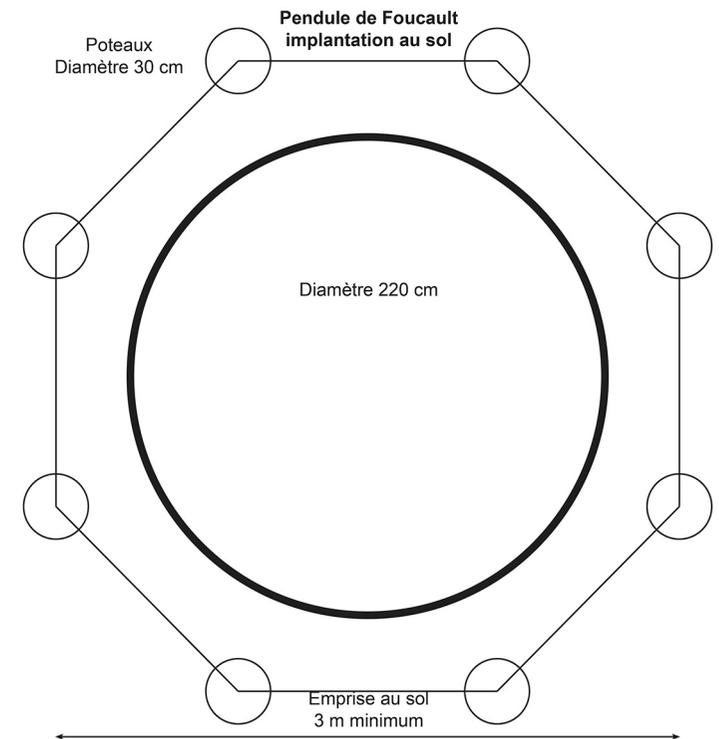
L'installation

Le pendule de Foucault nécessite une hauteur sous plafond de 8 mètres minimum afin de rendre le mouvement d'oscillation et de déviation du pendule observable dans de bonnes conditions.

Il est nécessaire d'accrocher la platine en hauteur sur plafond ou poutre à l'aide de 4 vis de fixation.

Cet accrochage nécessite le plus souvent une nacelle pour le technicien habilité à réaliser l'installation et l'accord de l'architecte ou des responsables du bâtiment de l'établissement scolaire.

Un dispositif de poteaux permet de limiter l'accès du public au pendule.



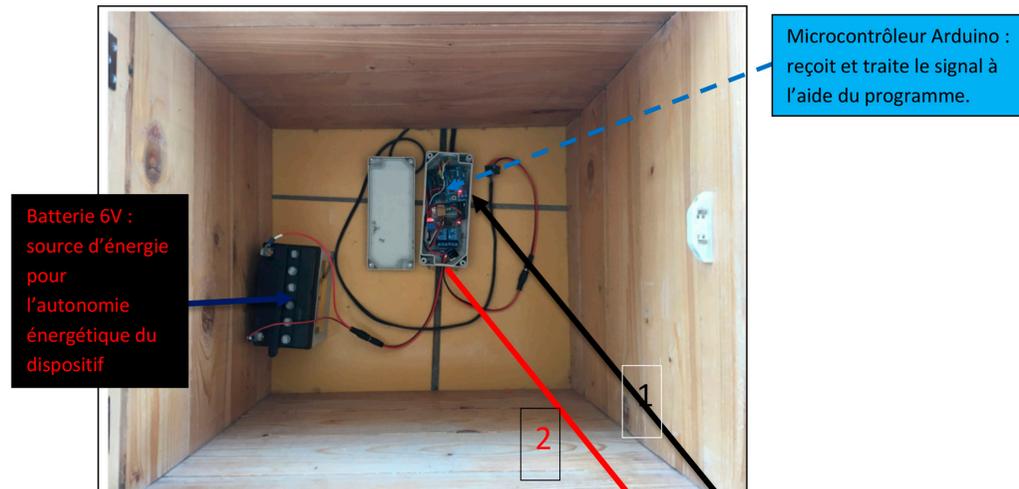
Dispositif d'entretien

L'oscillation du pendule a besoin d'être entretenue afin de conserver une amplitude régulière. Un nouveau dispositif électronique a été réalisé les élèves du lycée Sylvia Montfort à Luisant.

Principe d'entretien :

1 : des capteurs de champ magnétique détectent le passage de l'aimant permanent contenu dans la sphère puis un signal est envoyé au microcontrôleur.

2 et 3 : Le programme implanté dans ce dernier permet de générer une force répulsive toutes les fois que la boule passe, permettant ainsi d'entretenir le mouvement.

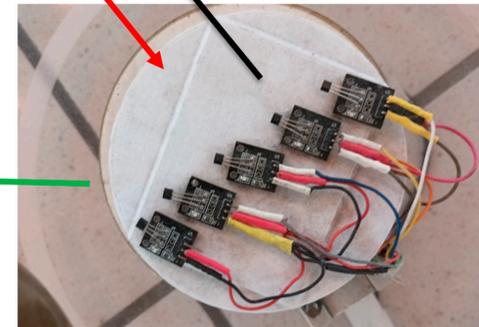


Microcontrôleur Arduino : reçoit et traite le signal à l'aide du programme.

Batterie 6V : source d'énergie pour l'autonomie énergétique du dispositif



Bobine contenant l'aimant permanent.



Capteurs du champ magnétique associés à la bobine produisant la force de répulsion.

Modalités, conditions

Le pendule de Foucault est un dispositif itinérant mis à disposition des établissements scolaires par Centre•Sciences avec le soutien du Conseil régional Centre-Val de Loire dans le cadre de ses missions de diffusion de la culture scientifique.

Centre•Sciences prend en charge la mise à disposition et le transport du matériel et l'accompagnement à l'installation du pendule.

Une convention de mise à disposition est établie entre Centre•Sciences et l'établissement.

L'établissement s'engage à adhérer à Centre-Sciences et à valoriser le dispositif auprès des élèves et des établissements scolaires situés à proximité ou lors d'événements publics comme la fête de la science. Une inauguration et présentation pourra être envisagée.



Présentations

Le pendule de Foucault a été présenté en région Centre-Val de Loire à :



Fête de la science - Mairie de Tours (37)



Lycée Vaucanson - Tours (37)



Lycée Sylvia Montfort - Luisant (28)

Découvrir sur la vidéo « Les sciences Autrement »

<https://www.youtube.com/watch?v=Fu-Cy2kjTeyw&list=PLBAXdXwgcVovR3IYRjibVn0cSn-4bwoth&index=24&t=1s>

Histoire du pendule

A son époque, nul ne doutait de la rotation de la Terre mais, en dehors de l'observation du mouvement apparent des étoiles, personne n'avait pu mettre en évidence ce phénomène simple. Certains savants pensaient même qu'il était impossible de montrer cette rotation avec une expérience uniquement terrestre. Képler avait donné un argument intéressant pour justifier la rotation de la Terre : « Pour justifier de l'immobilité de la Terre, on avance l'argument que si elle tournait sur elle-même, la force centrifuge la ferait voler en éclats...mais l'explosion de l'Univers serait bien plus à craindre si c'était le ciel qui tournait puisqu'il est de plus grand rayon ».

C'est en janvier 1851, que Foucault monte dans sa cave sa première expérience. Pour cela, il utilise un fil métallique de deux mètres de long supportant un lourd poids de fonte. Il met en évidence un mouvement infime. Un mois plus tard, Foucault peut installer son expérience devant les Académiciens.

Le 3 février 1851, certains reçoivent une invitation ainsi libellée : « Vous êtes invités à venir voir tourner la Terre dans la salle méridienne de l'Observatoire de Paris ».

Le pendule mesure cette fois onze mètres de haut. Ses oscillations sont plus longues et sa déviation est, bien sûr, plus sensible, plus manifeste aux yeux du public.

Louis Bonaparte autorise l'installation de l'expérience au Panthéon au mois de mars ce qui permet aux Parisiens de venir assister en masse à cette majestueuse expérience.

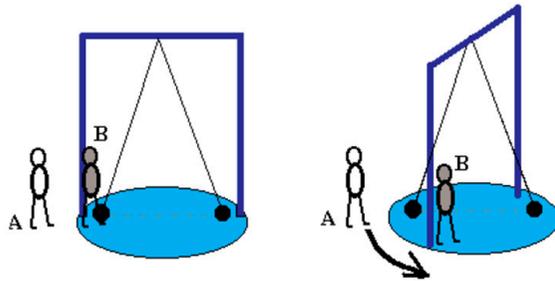
Dans cette nouvelle disposition, la longueur du fil d'acier est de 67 mètres, le globe très dense, d'un diamètre de 18 centimètres a une masse de 28 kilogrammes. Le 31 mars, le pendule a été mis en branle avec un luxe de précautions.

« Après une oscillation double de 16 secondes de durée, écrit Foucault, on l'a vu revenir à 2 millimètres et demi environ à gauche du point de départ. Le même effet continuant à se produire à chaque oscillation, la déviation a été grandissant toujours plus, proportionnellement au temps ».

Cette découverte scientifique connaît un tel succès public que, l'expérience est reproduite à New York, Rome, Bristol, Dublin, Londres, Ceylan, Rio de Janeiro...

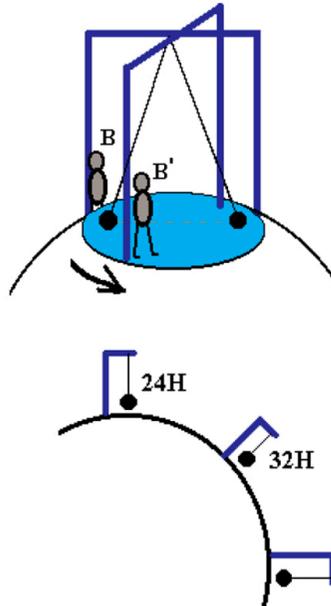


Principe du pendule



L'expérience peut être expliquée de façon plus ou moins complète selon le niveau des spectateurs. On peut expliquer le principe assez simplement, par contre cela s'avère plus délicat pour des mesures expérimentales. Un pendule en mouvement conserve la direction de ses oscillations, même si l'on tourne son support. Le personnage A situé à l'extérieur voit le support tourner et le pendule conserver le même plan d'oscillation. Le personnage B, entraîné par le mouvement, voit le plan d'oscillation du pendule se déplacer par rapport au support.

Variation du plan d'oscillations en fonction de la latitude



Si l'on place un pendule au pôle Nord, le plan d'oscillation se décale progressivement par rapport au personnage. Celui-ci voit ce décalage s'effectuer dans le sens des aiguilles d'une montre. Si le plan d'oscillation ne bouge pas, c'est donc la Terre qui bouge. La Terre effectuant un tour sur son axe en 24h, le plan d'oscillation du pendule tourne en 24h.

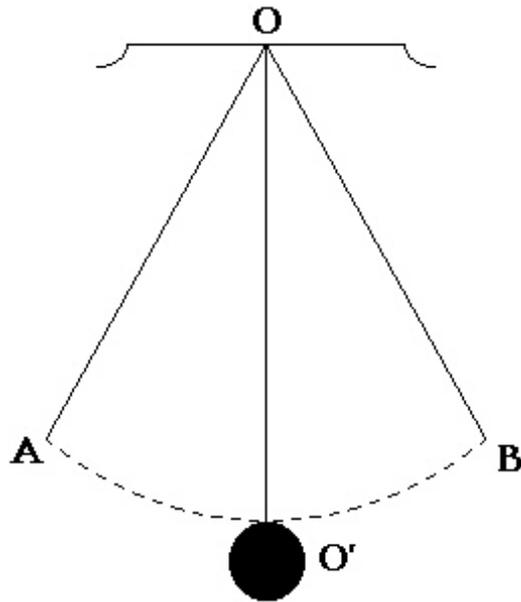
Si le pendule est situé à une autre latitude, le problème se complique. Pour un pendule situé à l'équateur que nous supposons pour simplifier, lancé dans une direction Est-Ouest, donc selon le plan de l'équateur, on voit que la rotation de la Terre n'a aucune raison de modifier son plan d'oscillation. Le plan d'oscillation reste donc fixe.

A toute autre latitude, le plan d'oscillation tourne selon un angle :

$$A = 360^\circ \times \sin(\text{Latitude})$$

A Paris, 48° de latitude le plan se décalde d'un angle de 267° en 24h.
Soit environ 1° toutes les 5 minutes.

Oscillation du pendule



On raconte que c'est par hasard, en regardant osciller une lampe suspendue à une longue chaîne, que Galilée découvrit ce que l'on nomme l'isochronisme des oscillations d'un pendule. Cela signifie qu'une oscillation, qu'elle soit ample ou réduite dure toujours le même temps. C'est cette observation qui est notamment à l'origine des horloges à balancier.

La période d'oscillation d'un pendule simple varie exclusivement en fonction de la longueur ou de la gravité.

Plus le pendule est long, plus il met de temps à revenir...

La période d'un pendule simple $T = 2 \text{ Pi } \sqrt{L/g}$

« g » étant l'initiale de « gravité » est une l'unité d'accélération correspondant approximativement à l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre. Sa valeur conventionnelle, définie par la troisième conférence générale des poids et mesures de 1901, est de 9,806 65 m/s² ou 9,806 65 N/kg.

Pour un pendule de 8 m
 $T = 2 \text{ Pi } \sqrt{8/9,81} = 5,6 \text{ s}$

Pour un pendule de 13 m
 $T = 2 \text{ Pi } \sqrt{13/9,81} = 7,2 \text{ s}$

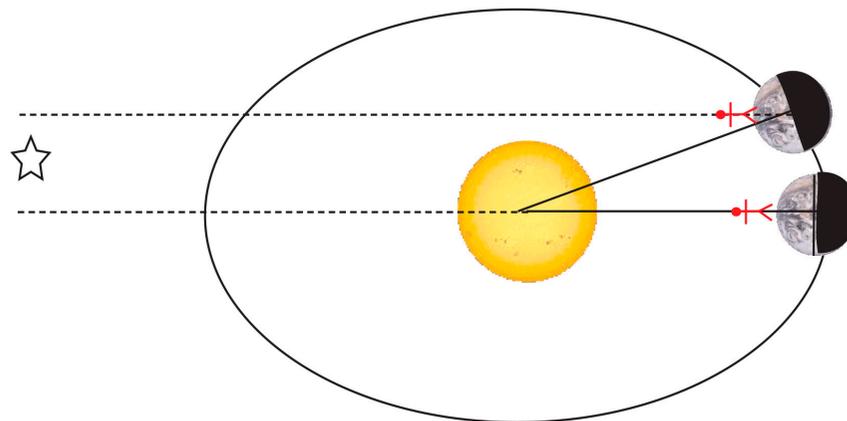
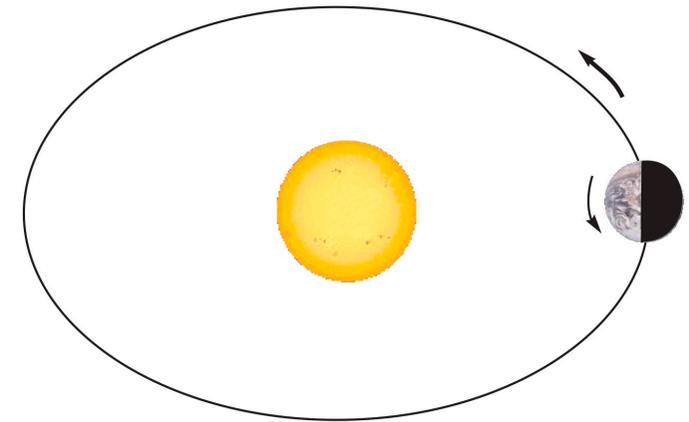
Le seul avantage d'un poids élevé que le permet la résistance du fil c'est que les oscillations dureront plus longtemps avec moins de frottements.

Les musiciens qui utilisent un métronome connaissent bien le principe en déplaçant le poids sur la tige du métronome qui oscillera différemment.



Les mouvements de la Terre

Les planètes tournent sur elles-mêmes, nous en avons l'évidence par la succession des jours et des nuits. Une planète se déplaçant autour du Soleil, le jour solaire est la période de révolution de la Terre par rapport au Soleil entre deux midis successifs. Mais l'orbite de la Terre est une ellipse, ainsi la durée du jour solaire est variable tout au long de l'année, ce qui nous introduit une vraie difficulté lorsqu'on veut une mesure précise du temps. Afin de faciliter cette mesure du temps, il a été défini un jour solaire moyen de 24 heures.



Or l'observation des étoiles montre une bien plus grande régularité. Si on observe le ciel toutes les nuits, on constate rapidement qu'une même étoile repasse par le méridien régulièrement avec une période de 23 h 56 mn 4 s. Les étoiles étant situées à l'infini, on peut considérer qu'elles représentent un repère fixe par rapport auquel on peut mesurer la rotation de la Terre. On nomme jour sidéral cette période qui ramène la même étoile au méridien. Imaginons un alignement parfait Terre, Soleil et une

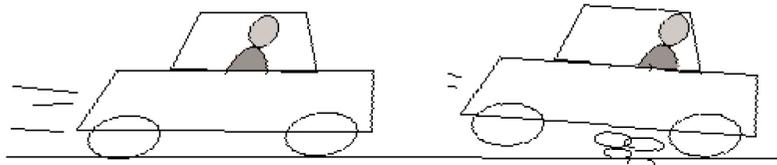
étoile située à l'infini. Au bout d'un jour sidéral de 23 h 56 mn 4 s, la Terre a effectué une rotation sur elle-même, s'est déplacée par rapport au Soleil et se retrouve face à notre étoile. Pour refaire face au Soleil, la Terre doit tourner encore un peu, le jour solaire de 24 h est un peu plus long que le jour sidéral.

Définitions

Révolution en 1 an autour du Soleil dans le sens inverse des aiguilles d'une montre : appelé sens direct (trigonométrique) depuis le pôle Nord.

Rotation en 1 jour d'Ouest en Est : on voit le Soleil se lever à l'Est et se coucher à l'Ouest.

Les forces de Coriolis



Expérience : quand une voiture freine, le passager peut, sans ceinture, percuter le pare-brise. Un observateur extérieur voit l'automobile s'arrêter et le passager poursuivre son chemin. Le passager à l'intérieur du véhicule interprète sa projection vers l'avant par

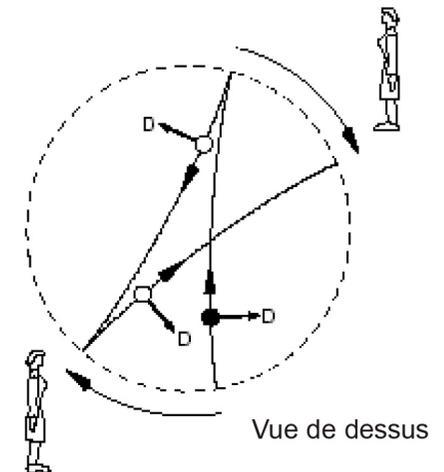
l'existence d'une force due à la décélération, c'est une force d'inertie.

Comme la Terre tourne, ce n'est pas un repère galiléen, ainsi, si un objet est en mouvement par rapport à la Terre, son mouvement sera perturbé par des forces d'inertie. Dans ce cas, les forces sont appelées forces de Coriolis du nom du savant qui les a étudiées. Pour un observateur terrestre, on explique la déviation du pendule par l'action des forces de Coriolis. Ces forces agissent sur tout corps en mouvement par rapport à la Terre, donc sur des corps en mouvement vertical ou horizontal.

Reich vers 1830 avait montré qu'une pierre lâchée dans un puits de mine, à l'abri du vent, après une chute de 158 m avait dévié à l'arrivée de 28 mm par rapport à la verticale. Mais la déviation étant trop faible, les autres savants n'avaient pas admis que cela montrait la rotation de la Terre, des erreurs de manipulation pouvant aussi expliquer cette déviation.

Foucault avait compris que la boule du pendule se comporte comme un projectile lancé horizontalement. Le pendule subit les forces de Coriolis pendant tout le temps qu'il oscille et les effets en s'accumulant sont beaucoup plus importants que dans la chute libre. Pour le pendule de Foucault, la force de Coriolis est horizontale, perpendiculaire à son mouvement et elle le dévie vers sa droite. Un observateur fixé sur le pendule aurait l'impression, en avançant, de tourner à droite dans l'hémisphère Nord (à gauche dans l'hémisphère Sud).

Le dessin montre que la force tirant toujours la boule à droite, les effets s'accumulent et le plan d'oscillation tourne dans le sens des aiguilles d'une montre pour un observateur situé au-dessus du pendule.



Qui est Foucault ?

Jean Bernard Léon Foucault

Né à Paris le 18 septembre 1819 et mort à Paris le 11 février 1868, il entreprend des études de médecine qu'il abandonne rapidement pour se consacrer à la physique.

En 1845, il réalise la première photographie du soleil (daguerréotype), puis la première photographie d'une éclipse de soleil. Il réalise aussi les premiers clichés photographiques d'éléments microscopiques.

Il devient journaliste scientifique, rendant compte des débats de l'Académie des sciences, avec un sens critique qui ne lui fera pas que des amis. Cela explique en partie qu'il n'est entré à l'Académie des Sciences qu'après une sixième tentative.

Il perfectionne l'arc électrique et l'utilise pour éclairer la scène de l'Opéra.

En 1850, en utilisant un miroir tournant entraîné par une turbine à vapeur, il effectue une mesure très précise de la vitesse de la lumière sur une distance de quelques mètres. En 1857, il réalise le premier un miroir de 80 cm de diamètre en verre poli, puis argenté ce qui améliore la qualité des images obtenues avec un télescope.

Toujours dans le domaine de la mécanique, il invente en 1852 le gyroscope, qui sera utilisé par la suite pour aider les navires (1910), les avions (1912) ou les engins balistiques à conserver leur cap.

On peut citer encore ses travaux en électromagnétisme, avec les courants qui portent aujourd'hui son nom (courant de Foucault), et qu'il observe en 1855.



Intérêts pédagogiques

Il est possible d'aborder le pendule depuis le primaire jusqu'au lycée à la fois d'un point de vue scientifique mais aussi historique.

On peut rappeler la complémentarité entre le théoricien et l'expérimentateur. Foucault, qualifié à treize ans de lent et paresseux par ses professeurs, quitte le collège et termine ses études avec un professeur particulier. N'ayant pas suivi les grandes écoles, il n'a pas le niveau en mathématiques des autres savants mais c'est un expérimentateur de génie.

Ses mesures, montrant que de la vitesse de la lumière dans l'air est plus grande que dans l'eau, justifient la théorie ondulatoire de la lumière, théorie qui prévoyait ce phénomène, alors que la théorie corpusculaire prévoyait un résultat inverse. L'expérience au service de la théorie.

En sens inverse, des théoriciens imaginent des appareils comme le LASER, appareils qui feront progresser l'expérimentation. La théorie au service de l'expérimentation.

La précision des mesures, liée aussi à celle des appareils de mesure, est également un facteur très important dans cette histoire. Les effets sur le premier pendule de Foucault étaient infimes...Il a su les observer et les amplifier. Quand on améliore la qualité des mesures, on met en évidence des phénomènes nouveaux qui s'avèrent parfois extrêmement importants pour la physique.

Thèmes abordés : mouvement, pendule, mesure du temps, déplacement, repère, oscillation, période, longueur, masse, poids, force, pesanteur, gravitation, énergie cinétique, énergie potentielle...



Ressources

Musée des Arts et Métiers :

<https://www.arts-et-metiers.net/musee/sphere-du-pendule-de-leon-foucault>

La main à la pâte :

<https://fondation-lamap.org/node/7350>

Ligue de l'enseignement :

http://ligue31.net/images/stories/lettre_lectronique/Pendule_de_Foucault_et_la_rotation_de_la_Terre.pdf

Wikipédia :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Pendule_de_Foucault

Observatoire de Paris :

https://media4.obspm.fr/public/AAM/pages_ed-02/exo-pendule-foucault.html

Université de Lyon :

<http://math.univ-lyon1.fr/~mizony/penduleF.htm>

Contact

Centre•Sciences, CCSTI de la région Centre-Val de Loire

72 faubourg de Bourgogne 45000 Orléans

Tél : 02 38 77 11 06 - Mél : contact@centre-sciences.fr