#### VOUS ÊTES INVITÉS À VOIR TOURNER LA TERRE



#### VOUS ÊTES INVITÉS À VOIR TOURNER LA TERRE

COLLÉGIALE Ste WAUDRU



# LE PENDULE DE FOUCAULT? CETTE EXPÉRIENCE MYTHIQUE EST À LA PHYSIQUE CE QUE LE NOMBRE D'OR EST AUX MATHÉMATIQUES, ET CE QUE LA CHAPELLE SIXTINE EST À LA PEINTURE; ELLE FAIT PARTIE DE L'IMAGINAIRE COLLECTIF.

MAIS QU'EST-CE QUE CE
PENDULE ? COMMENT PEUTIL MONTRER QUE LA TERRE
TOURNE BIEN SUR ELLE-MÊME ?
EXISTE-T-IL D'AUTRES MOYENS
DE PROUVER QUE NOUS VIVONS
EFFECTIVEMENT SUR UN MONDE
EN ROTATION ?

LE PENDULE DE FOUCAULT FAIT PARTIE DES QUELQUES RARES EXPÉRIENCES QUI PERMETTENT DE PROUVER QUE NOTRE TERRE TOURNE BIEN SUR ELLE-MÊME. DEPUIS LEUR PLUS JEUNE ÂGE EN EFFET, LES ENFANTS APPRENNENT, TELLE UNE RÉVÉLATION, QUE LA TERRE TOURNE SUR ELLE-MÊME EN PRÈS DE 24 H ET QU'ELLE

BOUCLE UNE RÉVOLUTION
AUTOUR DU SOLEIL EN UN PEU
PLUS DE 365 JOURS. TOUT LE
MONDE EN EST SÛR. BIEN SOT
EN EFFET CELUI QUI REMETTRAIT
EN QUESTION CE SAVOIR DE
BASE! IL N'EST D'AILLEURS PAS
RARE D'ENTENDRE CERTAINES
VOIX SE MOQUER DE LA NAÏVETÉ
DES ANCIENS, CONVAINCUS QUE
LA TERRE ÉTAIT IMMOBILE AU
CENTRE DE L'UNIVERS!

# Le pendule de Foucault



#### **TOUT EST RELATIF**

En réalité, le problème est loin d'être évident. Oublions les connaissances qui nous ont été enseignées sur les bancs de l'école primaire, et revenons-en à la source : l'observation du ciel à l'œil nu. Le matin, le Soleil se lève grosso modo à l'Est¹. L'Astre du jour monte ensuite progressivement dans le ciel, pour culminer vers la mi-journée au Sud. Le soir, le Soleil se couche sous l'horizon Ouest. Lorsque la nuit tombe et que l'on observe suffisamment longtemps le ciel, on constate que les étoiles se déplacent avec un mouvement d'ensemble d'Est en Ouest. Tout se passe comme si les étoiles étaient fixées sur la voûte céleste, et que cette dernière était en rotation autour de la Terre. Les Anciens utilisaient d'ailleurs le concept de sphère des fixes pour parler de cette coquille d'étoiles qui semble envelopper notre monde.

Le Soleil ne se lève exactement à l'Est et ne se couche exactement à l'Ouest que lors des équinoxes d'automne et de printemps, à savoir approximativement les 21 septembre et 21 mars. Si le Soleil se levait et se couchait tous les jours au même endroit, la durée du jour serait constante tout au long de l'année. En hiver, il se lève dans la direction du Sud-Est, se couche au Sud-Ouest. En été, il se lève au Nord-Est, et se couche au Nord-Ouest.

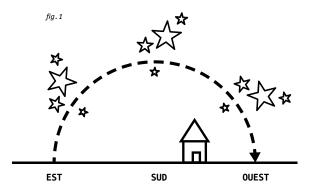


fig.1
Les étoiles suivent un mouvement d'ensemble en se levant à l'Est et en se couchant à l'Ouest. Ce mouvement
n'affecte pas la forme des constellations. On peut donc
l'interpréter comme lié à un moment d'ensemble de la
voûte céleste.

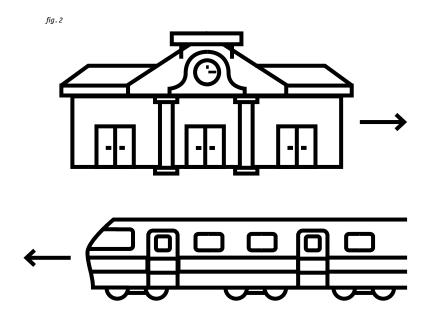


fig. 2
Assis dans un train en mouvement, qui n'a jamais eu cette impression étrange de voir le paysage se mouvoir vers l'arrière ? Les étoiles sont notre paysage, et notre Terre le train. Mais comment prouver que c'est bien le train qui bouge et non le paysage ?

Mais qui tourne réellement ? Le problème est finalement assez proche de celui d'un train longeant le quai d'une gare, et dont les passagers éprouvent l'étrange impression d'être à l'arrêt et de voir la gare partir vers l'arrière.

Dans le cas de la voûte céleste, le problème est plus subtil encore... Comment prouver que ce n'est pas le paysage céleste qui tourne autour de la Terre, mais bien notre vaisseau spatial Terre qui est en rotation sur lui-même? Une des objections majeures à l'idée que la Terre est en rotation a souvent été de dire que si elle tournait vraiment, nous le sentirions physiquement. Après tout, lorsqu'enfant, nous nous installions sur un de ces manèges de foire, nous sentions bien que nous tournions, même les yeux fermés... Mais sur notre Terre ferme, rien de tout cela. Nous voyons juste les astres tourner autour de nous. Il est donc parfaitement naturel de croire que nous vivons sur un monde immobile, et que tout tourne autour de nous. Et pourquoi pas finalement?



D'autres observations simples peuvent aussi être réalisées : relever la position de la Lune d'une nuit à l'autre, ou celles du Soleil et des planètes au fil des semaines et des mois. Rien de tout cela ne remet a priori en question l'idée d'une Terre immobile au centre de l'Univers. La preuve, le modèle géocentrique imaginé par les Grecs et amélioré par les savants arabo-musulmans a tenu bon près de deux millénaires<sup>2</sup> !

#### **UN PEU D'HISTOIRE**

La vision héliocentrique du problème est quant à elle bien antérieure aux travaux de Nicolas Copernic (1473-1543). En effet, l'idée alternative – et non naturelle ! – selon laquelle le Soleil occupe le centre de l'Univers, et que la Terre est en réalité une planète en rotation sur ellemême, tournant autour de l'astre de feu, a été proposée à plusieurs reprises.

Le Grec Aristarque de Samos (env. 310-230 av. J.-C.), contemporain d'Archimède de Syracuse, l'évoque déjà quelques siècles avant notre ère. Des savants arabes du XI° siècle, comme Al-Biruni, se penchent également sur cette hypothèse. Mais à chaque fois, le modèle géocentrique tient bon. En effet, pourquoi laisser tomber une théorie à laquelle tout le monde est habitué, capable de prévoir avec précision les positions futures des astres dans le ciel, au profit d'une vision du monde certes révolutionnaire, mais qui n'améliore en rien la qualité des prévisions, que du contraire ?

Si nous considérons en effet que la Terre et les planètes tournent autour du Soleil en suivant des trajectoires circulaires, il n'est pas possible de reproduire précisément leurs mouvements apparents dans le ciel. Le modèle héliocentrique proposé par Copernic est séduisant sur le plan des idées, mais n'est pas très performant concrètement!

Après avoir étudié minutieusement les mesures prises pendant des décennies par Tycho Brahé Johan Kepler comprend, quant à lui, que les planètes se déplacent autour du Soleil non pas en suivant des orbites circulaires, mais bien des trajectoires elliptiques, dont le Soleil occupe l'un des

En effet, ce modèle permet de prévoir, avec une relative précision, les mouvements apparents des étoiles, des cinq planètes visibles à l'oeil nu, de la Lune et du Soleil! deux foyers<sup>3</sup>. Ce résultat est totalement anti-intuitif. Jusque-là, le cercle avait en effet toujours semblé un objet bien plus naturel et élégant qu'une ellipse!

Il faut encore attendre le génie d'Isaac Newton, pour montrer que les orbites elliptiques découlent en réalité tout à fait naturellement de sa théorie de la gravitation : si une planète est attirée par le Soleil avec une force inversement proportionnelle au carré de la distance qui l'en sépare, alors on retrouve comme par enchantement toutes les caractéristiques curieuses des mouvements planétaires découvertes par Kepler.

Contemporain de Kepler, Galilée est le premier à observer scientifiquement le ciel avec une lunette. Avant lui. les astronomes observaient la voûte céleste à l'œil nu ou s'aidaient d'instruments pour mesurer les positions des astres. Galilée, lui, voit ce que personne, avant lui, n'a jamais vu ! Il découvre ainsi en 1609 que quatre lunes tournent autour de Jupiter. La théorie héliocentrique marque un point : la Terre n'est donc peut-être pas le centre de rotation de l'Univers, puisqu'il voit des objets tourner autour de Jupiter ! Galilée réalise d'autres observations cruciales, comme celles des phases de Vénus⁴ que le modèle géocentrique peine à décrire. Galilée devient un fervent défenseur du modèle héliocentrique. Mais ses idées ne plaisent pas : il risque de brûler sur le bucher... Il finit par se rétracter. La légende raconte que Galilée aurait cependant prononcé à voix basse à la fin de son procès « Eppur si muove », « Et pourtant elle tourne ».

#### LE PENDULE DE GALILÉE

Alors, comment prouver que la Terre tourne bien sur ellemême ? Il n'existe en réalité que peu d'expériences capables de le montrer. Le pendule de Foucault en est une, même si l'expérience réalisée à notre latitude n'est pas aussi facilement interprétable que si elle était réalisée aux pôles.

Pour bien comprendre les tenants et les aboutissants de cette célèbre expérience, remémorons-nous quelques éléments du cours de physique du secondaire. Pas de panique

3

Pour construire un cercle, on a besoin de connaitre son centre et son ravon. Pour construire une ellipse, on a besoin de deux points - les foyers - et d'une longueur. Le jardinier qui désire réaliser un parterre elliptique plante deux bâtons dans le sol - les foyers - et les relie par une ficelle suffisamment longue. Il se déplace ensuite autour des bâtons en tenant la corde. de sorte qu'elle soit toujours tendue. Le chemin qu'il parcourt alors autour des bâtons est une ellipse. Il lui suffit de le matérialiser au sol.

4

Observée depuis la Terre au travers d'un instrument d'optique, la planète Venus. connue aussi sous le nom d'Étoile du Berger, présente des phases, comme la Lune: on peut la voir en fin croissant, en premier quartier, en pleine Venus, etc. La grande différence entre les phases de Vénus et celles de la Lune, c'est que contrairement à celui de la Lune, le diamètre apparent de Vénus varie avec la phase de la planète. Cette caractéristique s'explique aisément dans le cadre du modele héliocentrique.



cependant : une boule et une ficelle devraient suffire pour nous rafraîchir la mémoire !

Si nous attachons une boule à un câble suspendu, nous obtenons ce que l'on appelle un pendule. L'étude de ce système très simple ne motive pas beaucoup les étudiants. Il n'est pas rare de les entendre dire « mais pourquoi donc nous fait-on étudier le mouvement d'un pendule ? ». Et pourtant, son étude se révèle en réalité très riche, et trouve de nombreuses applications dans des contextes plus sophistiqués<sup>s</sup>. Mais qui, le premier, a étudié le pendule ?

\_

Comme par exemple, la description quantique des particules élémentaires et de leurs interactions.

6

On sait aujourd'hui qu'il s'agit d'une légende inventée par Viviani, un disciple de Galilée. En réalité, le physicien italien s'est servi du caractère répétitif du mouvement du pendule pour étudier plus précisément la chute des corps.

7

Il semble que Galilée mesurait la période des pendules en se servant de son pouls.

8

La période dépend en réalité de deux autres paramètres : la planète sur laquelle est réalisée l'expérience et la distance du pendule au centre de l'astre. Plus la gravité est élevée, plus la période du pendule sera petite. La légende raconte que Galilée, encore lui, une trentaine d'années avant ses premières observations du ciel, aurait observé le mouvement d'un lustre suspendu au plafond de la cathédrale de Pise<sup>6</sup>. Il observe un fait étrange : lorsque le lustre se balance au bout de son câble, il met approximativement toujours le même temps<sup>7</sup> pour effectuer un aller-retour, indépendamment ou presque de l'amplitude du mouvement!

Lançons le pendule, il se met à osciller. Il enchaîne les allers-retours, mais à cause des différents frottements, il va de moins en moins loin. On pourrait donc penser que la durée de l'aller-retour – la période – diminue avec l'amplitude (distance entre le point d'éloignement maximal du balancier et le point d'équilibre). Cette distance étant de moins en moins grande, la période devrait donc diminuer également. Eh bien non ! Aussi curieux que cela puisse paraître, la période d'un pendule ne change pas au cours de son mouvement. Galilée pensera même se servir de cette propriété connue sous le nom savant d'isochronisme – pour fabriquer une horloge... Mais c'est finalement le physicien hollandais Christian Huygens qui concrétisera ce projet bien plus tard, en réalisant la première pendule, au féminin cette fois.

Galilée va aller plus loin, et tente de comprendre de quoi dépend la période du pendule. De la longueur du fil ? De la masse de l'objet suspendu ? Il découvre que la période ne dépend en réalité que de la longueur du fil<sup>8</sup> : la période est d'autant plus grande que le câble du pendule est long. Autre point d'importance : le mouvement de va-et-vient du pendule n'a lieu que dans un seul plan, imposé naturellement lors du lâcher de la sphère. C'est cette dernière

propriété, *a priori* anodine, qui constitue la clé du pendule de Foucault.

Quittons la Toscane du XVII<sup>e</sup> siècle et, rejoignons le Paris du XIX<sup>e</sup> : la Terre aura tourné près de 98 000 fois entre les travaux de Galilée et ceux de Léon Foucault.

Expérimentateur hors pair, Foucault décide de s'attaquer à un problème coriace, véritable écueil pour des générations de physiciens : prouver expérimentalement et directement que la Terre tourne sur elle-même, juste pour le plaisir, car la rotation de la Terre ne fait plus aucun doute à cette époque. Diverses tentatives avaient en effet été menées auparavant pour traquer les signes éventuels de cette rotation en vain. Mais quels effets faut-il chercher ?

#### **TOURNE, TOURNE MANÈGE**

L'idée est la suivante : imaginez des enfants, Jean et Pierre, debout sur un plateau tournant - un peu comme le carrousel de la fête foraine -. Jean décide de lancer une balle à Pierre. Il le vise, et lui lance la balle. Si le manège ne tourne pas et que le premier enfant vise correctement, la balle se déplace naturellement en ligne droite et arrive dans les mains de Pierre. Par contre, si le plateau tourne, la balle, qui se déplace toujours naturellement en ligne droite9, n'atteint pas Pierre, car au moment où elle aurait dû le toucher, Pierre n'est plus là, emporté par la rotation du plateau. Les enfants assistent donc à un phénomène curieux, mais finalement logique : pour eux, la balle est systématiquement déviée ! Cette déviation, dite de Coriolis, n'apparaît que pour les enfants qui sont sur le plateau, elle n'est que purement apparente - comme on parle du mouvement apparent du Soleil et des étoiles dans le ciel. Pour les personnes qui se trouvent sur le sol, à l'extérieur du plateau, et qui observent la scène, la déviation n'existe pas : pour elles, la balle se déplace toujours en ligne droite, ce sont les enfants sur le plateau qui tournent autour de cette trajectoire rectiligne. Les enfants peuvent interpréter cette déviation de deux façons différentes. Soit, ils se disent : « si nous voyons la balle dévier, c'est parce qu'une force agit sur elle ».

Nous négligeons ici l'effet de la gravité qui induit un mouvement parabolique à la balle!



fig.3

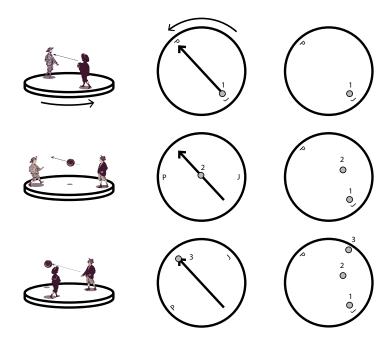


fig. 3 Ce tableau se lit ligne par ligne, le temps s'écoulant du haut vers le bas. La première colonne montre Pierre et Jean qui se lancent une balle sur un plateau en rotation. La deuxième colonne montre la même scène mais telle que la verrait une troisième personne située au-dessus du manège. La dernière colonne montre comment Pierre et Jean voient se déplacer la balle depuis leurs positions. La balle, qui se déplace réellement en ligne droite, semble suivre une trajectoire courbe lorsqu'elle est observée depuis le plateau (référentiel en rotation). La réalité est en fait encore un peu plus complexe, car lorsque Jean lance la balle, il lui communique aussi involontairement sa propre vitesse, qui est tangente à sa trajectoire ; ce schéma n'en tient pas compte.

Soit, ils se rappellent qu'ils se trouvent sur un manège en rotation et se disent : « il n'y a aucune raison pour que la balle ne se déplace pas en ligne droite ; ce que nous voyons est donc la conséquence de notre propre rotation ». La force à laquelle doivent faire appel les enfants dans le premier cas de figure - et qui n'existe donc pas ! - est dite fictive10. Elle a été baptisée par les physiciens force de Coriolis. Ce curieux phénomène de déviation de Coriolis<sup>11</sup> constitue un puissant moyen pour savoir si il y a, ou pas, rotation... Imaginons que le plateau soit complètement enfermé sous une énorme cloche opaque qui empêcherait les enfants de voir le paysage autour d'eux. Dans un tel cas de figure, comment les enfants pourraient-ils savoir si leur manège est en rotation ? En se lançant la balle : si les enfants voient la balle se déplacer parfaitement en ligne droite, ils en déduiront que le manège est au repos. Par contre, s'ils constatent que la balle est déviée a priori sans raison (pas de vent, personne n'a perturbé la balle en plein vol, etc.), ils en déduiront que le plateau est en train de tourner !

Imaginons cette fois un très grand manège de plus de 12 500 kilomètres de diamètre : notre planète Terre. Quand nous lançons une balle à une personne en face de nous, si nous visons bien, la balle atteint son objectif. Pourtant, la Terre tourne : au moment où la balle arrive près de notre compagnon de jeu, celui-ci s'est déplacé, emporté par la rotation de la Terre ; la balle ne devrait donc pas le toucher - comme sur le carrousel de l'exemple précédent ! Le fait est que la Terre tourne lentement sur elle-même - un tour en 24 h, c'est beaucoup plus lent que le manège de foire qui fait, lui, un tour en moins d'une minute ! L'effet de déviation de Coriolis est donc, dans le cas de la Terre, infime. Autrement dit, entre le moment où la balle est lancée et le moment où le compagnon est sensé la rattraper, la Terre n'a pas eu le temps de tourner de façon tangible. La déviation ne deviendra donc visible que si le mouvement dure longtemps, c'est-à-dire sur des trajets suffisamment grands, par exemple avec deux personnes très éloignées l'une de l'autre.

0

Une autre force fictive bien connue est la force centrifuge : lorsque vous êtes debout dans un bus. vous vous sentez projeté vers la vitre lorsque le bus prend un virage. En réalité, cette force, pourtant capable de générer bien des accidents, n'existe pas : le bus tourne, et par inertie, vous continuez à vous déplacer tout droit. Résultat, vous vous retrouvez colle à la vitre !

11

On parle aussi d'accélération de Coriolis, car en apparence, la vitesse de déplacement de la balle change, tant en vitesse qu'en direction.

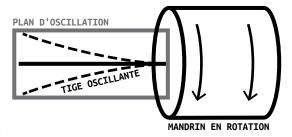


#### LE PENDULE DE LÉON FOUCAULT

Léon Foucault a une idée géniale : pourquoi ne pas tenter d'observer la déviation apparente liée à la rotation de la Terre, non plus en suivant le mouvement d'une simple balle, mais plutôt en se penchant sur le mouvement d'un pendule ? En effet, à chaque oscillation, le balancier du pendule est dévié de manière imperceptible en apparence, mais comme le pendule oscille un très grand nombre de fois, chaque petite déviation s'additionne aux précédentes<sup>12</sup>, et la déviation devient alors rapidement macroscopique et visible à l'œil nu !

Foucault explique avoir été convaincu de la faisabilité du pendule en réalisant une autre expérience, que vous pouvez renouveler. Prenez une fine tige métallique. Fixez-en horizontalement une extrémité dans un mandrin. Mettez la tige en vibration en éloignant verticalement l'extrémité libre de sa position d'équilibre, puis en la relâchant : elle se met à osciller rapidement dans le plan vertical, avant de progressivement perdre de l'amplitude et finir par s'arrêter. Jusque-là rien de révolutionnaire.

fig.4



12

À condition que le support de fixation du pendule, emporté lui aussi par la rotation de la planète, ne perturbe pas le mouvement de la sphère.

fig.4 Si l'on fait osciller une tige métallique dont une extrémité est fixée dans un mandrin en rotation, on constate que le plan d'oscillation de la tige ne tourne pas avec le mandrin. Si vous faites osciller la tige verticalement, et que vous mettez le mandrin en rotation, comment va évoluer le plan d'oscillation de la tige ? Naïvement, on pourrait s'attendre à ce que le plan d'oscillation suive la rotation du mandrin. Or, ce n'est pas du tout ce qui se passe! Le plan d'oscillation reste vertical, et n'est absolument pas emporté par la rotation, alors que le support de la tige tourne sur lui-même!

Ce résultat ouvre la porte à la réalisation de l'expérience du pendule de Foucault. Cette tige oscillante peut en effet facilement être comparée à un pendule : un objet est déplacé de sa position d'équilibre et est soumis à une force de rappel qui tend à la ramener vers son point d'équilibre initial. L'analogie avec le pendule est encore plus frappante si on imagine le mandrin en position verticale, avec la tige orientée vers le bas, oscillant autour de la verticale. Le mandrin en rotation peut alors être vu comme le plafond du bâtiment emporté par la rotation de la Terre, et la tige représente le pendule. Dès lors, Foucault en déduit que pour le pendule, la rotation du point de suspension ne doit donc pas affecter la direction du plan d'oscillation.

#### **AUX PÔLES**

Pour comprendre le plus simplement possible cette expérience, imaginons le pendule exactement au pôle Nord, en train d'osciller. Au cours de la journée, la personne qui observe le pendule tourne sur elle-même de l'Ouest vers l'Est, alors que le plan d'oscillation du pendule, lui, est immobile par rapport aux étoiles lointaines. Il n'y a en effet aucune raison qu'il en soit autrement. Dès lors, cet observateur polaire voit le plan du pendule tourner d'Est en Ouest en 24 h, de la même manière qu'il voit le Soleil ou les étoiles se déplacer dans le ciel d'Est en Ouest. Aucune force perpendiculaire susceptible de faire tourner le plan du pendule n'étant présente, l'observateur conclut que c'est le sol sous ses pieds qui est en rotation. De plus, la rotation apparente du plan d'oscillation du pendule, en un temps identique à celui que met la voûte céleste pour boucler un tour autour de la Terre, ne peut être une coïncidence, et ne peut s'expliquer que par la rotation même de notre planète ! Le pendule de Foucault, utilisé au pôle, est donc une preuve expérimentale directe de la rotation de la Terre.



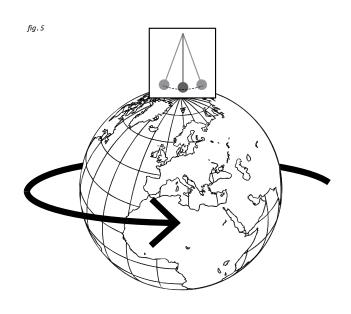


fig. 5 Aux póles, et uniquement aux póles, le plan d'oscillation du pendule de Foucault, insensible à la rotation de la Terre, reste fixe par rapport aux astres les plus lointains.

L'expérience du pendule de Foucault réalisée au pôle Sud – elle y a vraiment été réalisée, rien n'arrête les Physiciens! –, montre que le plan d'oscillation tourne sur lui-même, en apparence, en 24 h, comme au pôle Nord donc, mais dans le sens opposé. Le phénomène n'a évidemment pas changé, mais on l'observe « la tête en bas ». Être au pôle Sud et observer le plan du pendule osciller, revient à se placer sous une montre sans fond et à observer ses aiguilles tourner: elles tournent... dans le sens contraire des aiguilles d'une montre!



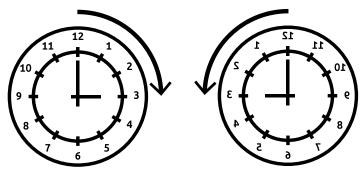


fig. 6

Vues du dessus, les aiguilles d'une montre tournent

bien entendu dans le sens horlogique (image de gauche)...

Par contre, s'il était possible de les regarder tourner

par le dessous, on les verrait tourner dans le sens

anti-horlogique (image de droite). Dès lors, si un ob
servateur situé au pôle Nord voit le plan d'oscillation

du pendule de Foucault tourner dans le sens horlogique

en 24 h, un observateur installé au pôle Sud – donc « la

tête en bas » – voit toujours le plan d'oscillation de

son pendule tourner en 24 h, mais cette fois dans le

sens anti-horlogique.

#### À MONS...

L'expérience devient malheureusement plus compliquée à interpréter si elle est réalisée ailleurs qu'aux pôles... Comment évolue le plan d'oscillation d'un pendule de Foucault situé à Mons par exemple ? Chez nous, le plan du pendule ne tourne pas en 24 h mais en un peu plus de 31 heures. Mais pourquoi 31 heures ? A priori, cette durée ne correspond à rien de bien précis!



Il est possible d'aborder le problème par différentes voies. La voie du calcul en est une. Elle montre que le temps de rotation à une latitude quelconque est donné par le temps de rotation aux pôles - 24 heures , divisé par le sinus de la latitude. Correct certes, mais peut-on aussi comprendre la mécanique du pendule de Foucault à une latitude quelconque sans pour autant rentrer dans de longs calculs ?

#### Intuitivement

Raisonnons de manière qualitative. Puisque les sens de rotation apparente du plan d'oscillation sont opposés aux pôles, nous pouvons en déduire qu'à mi-chemin – à l'équateur donc –, le sens de rotation doit s'inverser ; la vitesse de rotation du plan d'oscillation du pendule y est donc nulle - si elle ne l'était pas, la rotation ne pourrait changer de sens ! Si la vitesse de rotation du plan s'annule, il faut donc un temps infini à ce plan pour boucler un tour : sa période de rotation est donc infinie à l'équateur. Si vous vous trouvez au Burundi n'espérez donc pas pouvoir montrer la rotation de la Terre sur elle-même avec un pendule !

Comme au pôle Nord (ou Sud), le temps de rotation est de 24 h, et qu'à l'équateur, ce temps devient infini, il est raisonnable de penser qu'à toute autre latitude intermédiaire, le temps de rotation apparente doit être compris entre 24 h et l'infini. Autrement dit, plus on se rapproche de l'équateur, plus le plan d'oscillation du pendule a besoin de temps pour boucler un tour!

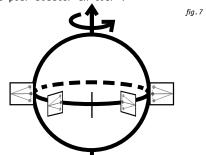


fig. 7

Le plan d'oscillation du pendule doit toujours être
localement vertical : il est donc impossible que ce plan
reste parallèle à lui-même ailleurs qu'aux pôles! Le
plan d'un pendule de Foucault n'est fixe par rapport aux
étoiles qu'aux pôles.

#### Géométriauement

Si nous pouvions observer les oscillations du pendule montois depuis un référentiel extérieur à la Terre et aligné sur des astres lointains, que verrions-nous ? Contrairement à ce que beaucoup d'ouvrages traitant du sujet affirment, le plan d'oscillation du pendule ne peut pas rester fixe par rapport à un tel référentiel extérieur.

Le plan n'est réellement fixe qu'aux pôles. En effet, ailleurs, à chaque instant, le pendule est soumis à deux contraintes importantes : d'une part, le point de fixation du pendule décrit un cercle autour de la Terre et d'autre part, le plan du pendule doit rester systématiquement vertical. Imaginons ce qui se passe pour un pendule oscillant à l'équateur. Lançons ce pendule dans la direction Nord-Sud. Le plan d'oscillation est perpendiculaire au sol, à chaque instant. La direction de ce plan ne peut donc que changer!

Dès lors, imaginer ce que voit finalement un observateur terrestre, se trouvant ailleurs qu'aux pôles, est loin d'être simple. Pourtant, une petite expérience facile à réaliser permet de le comprendre d'une manière étonnante. L'idée générale est que si le plan d'oscillation du pendule ne peut rester fixe par rapport aux étoiles lointaines, on peut considérer qu'entre deux instants successifs, il reste le plus possible parallèle à lui-même.

Visualisons ce phénomène en prenant une mappemonde - sans mappemonde, la compréhension de la manipulation n'est pas garantie !- Positionnons-nous à Mons, et imaginons lancer le pendule dans la direction Nord-Sud - autrement dit la direction donnée par le méridien local. Traçons sur cette mappemonde un trait qui représente la projection, sur le sol, du plan d'oscillation du pendule. La Terre tournant, Mons et le pendule se déplacent vers l'Est, le long du parallèle local.

#### Que se passera-t-il après un très bref instant ?

Le pendule se retrouve un peu plus à l'Est ; son plan d'oscillation tente de rester parallèle à ce qu'il était un instant plus tôt. Concrètement, on trace alors sur la mappemonde, à la nouvelle position de Mons et de son pendule, un deuxième trait, qui doit être parallèle au premier. En procédant de la sorte, de proche en proche, au fur et à mesure que Mons et son pendule sont embarqués par la rotation de la planète, on constate que les traces successives



dessinées sur la mappemonde se décalent, tournent de plus en plus par rapport aux repères locaux : la trace au sol qui matérialise le passage du pendule tourne littéralement sur elle-même. Mais la chose la plus étonnante, c'est que cette trace ne retrouve pas son orientation de départ après un tour de mappemonde : Mons et le pendule doivent encore effectuer environ un quart de tour supplémentaire de la mappemonde pour que la trace retrouve sa direction de départ ! Transposé à la vraie Terre, cela donne une période de rotation du plan d'oscillation de 24 h - un tour de Terre - plus un quart de tour - soit 6 h -, très proche de la période de 31 h observée à Mons. Si l'expérience était réalisée à 30° de latitude, deux tours de mappemonde seraient nécessaires pour retrouver la situation de départ, ce qui équivaut à une période de 48 h.

fig.8



fig. 8

Photographie d'une balle-mappemonde sur laquelle nous avons tracé à la craie, au milieu en bas, la projection au sol du plan d'oscillation d'un Pendule de Foucault lancé dans la direction Nord-Sud. Pour reproduire l'effet de la rotation de la Terre sur la direction d'oscillation, la trace est transportée parallèlement à elle-même sur la sphère, à la même latitude. Après une rotation complète de la Terre, la trace n'a pas encore retrouvé son orientation initiale.

Par contre, la même construction réalisée cette fois à l'équateur, montre que transporter la trace du plan d'oscillation du pendule parallèlement à elle-même ne modifie en rien son orientation dans les repères locaux, ce qui conforte l'idée déjà avancée que l'expérience du pendule de Foucault ne peut être utilisée à l'équateur pour prouver la rotation de la Terre.

#### Expérience étonnante sur un plan incliné !

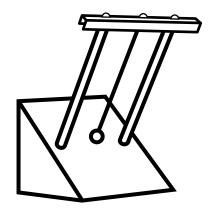
Pour visualiser la situation du pendule à Mons, il suffit de se rappeler que le sol de la collégiale, qui nous apparait comme parfaitement plan et horizontal, est en réalité tangent au globe terrestre à la latitude 50,5°. Le pendule de Sainte-Waudru oscille quant à lui dans un plan comprenant la verticale locale. Le plan est emporté par la rotation terrestre, et retrouve sa configuration initiale après 31 h environ. S'il est quasi impossible de visualiser par l'esprit la combinaison du mouvement d'oscillation d'un pendule installé à la latitude de Mons et de la rotation de la Terre, un simple montage permet de le faire : étonnement garanti!

Le principe de l'expérience est simple. Sur un plan incliné, de même inclinaison que le plan local à Mons, fixons une petite potence, suspendons-y un pendule – dont la corde est remplacée par une fine tige métallique<sup>13</sup>, mettons-le en oscillation, repérons la direction d'oscillation de départ, et faisons tourner l'ensemble en utilisant par exemple un plateau tournant.

Le résultat est stupéfiant : à notre grand étonnement, nous constatons qu'après avoir fait réaliser à l'ensemble un tour complet, le plan d'oscillation du pendule, lui, ne retrouve pas sa direction initiale ! Il faut encore tourner le plateau d'un quart de tour supplémentaire pour que le plan d'oscillation retrouve sa direction initiale. Or, il faut à la Terre 30 h pour effectuer un tour et un quart... L'ordre de grandeur de la période de 31 h mesurée à Mons est ici aussi retrouvé.

3

Un pendule ne peut osciller qu'autour de la verticale locale, définie par la pesanteur terrestre. Or, le pendule de notre maquette doit pouvoir osciller perpendiculairement au plan incliné pour reproduire ce qui se passe à Mons. La solution est simple: remplacer le fil du pendule par une fine tige métallique, suffisamment souple.



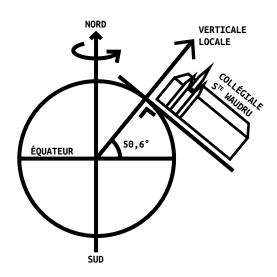


fig. 9 Le petit pendule métallique sur le plan incliné (schéma du haut) permet de simuler le mouvement du pendule de Foucault à la latitude de Mons (cf. schéma du bas).

#### Calcul élégant

Ces approches, aussi séduisantes soient-elles, ne permettent cependant pas de calculer la période de rotation du plan d'oscillation à une latitude quelconque. Il existe toutefois d'autres moyens d'aborder le comportement du pendule de Foucault à une latitude quelconque.

Peu de temps après l'expérience historique de Foucault, Joseph Liouville, professeur de mathématique au Collège de France, se penche comme tant d'autres sur ce problème épineux. La solution qu'il propose est à la fois simple et élégante.

Rappelons la question qui nous préoccupe : comment voit-on tourner, à une latitude donnée, le plan d'oscillation du pendule de Foucault ? Comme nous l'avons signalé un peu plus haut, le sol qui nous semble plan, peut être vu comme un plan localement tangent à la Terre (cf. fig. 10).

Dès lors, étudier la rotation du plan d'oscillation du pendule à cet endroit, revient à étudier la rotation apparente du plan d'oscillation autour de la verticale locale. Pour cela, il faut comprendre comment cette rotation est impactée par la rotation de la Terre. La solution de Liouville n'étonnera pas les lecteurs qui ont un peu manipulé des objets mathématiques bien connus sous le nom de vecteurs.

Pour tout connaître de la rotation locale du plan du pendule, il suffit de projeter le vecteur rotation14 globale de la Terre  $(\omega_{\text{\tiny TERRF}})$  sur la verticale locale. En effet, seul ce qui se passe autour de cet axe est important finalement.

La grandeur de cette projection - qui donne donc la vitesse de rotation autour de la verticale locale -, est la vitesse de rotation de la Terre multipliée par le sinus de la latitude ( $\omega_{\text{\tiny LOCAL}} = \omega_{\text{\tiny TERRF}}.\sin \,\lambda$ ). Le lien entre la vitesse angulaire et la période de rotation est donné par  $T=2\pi/\omega$ . Ces relations permettent de retrouver les résultats énoncés ractérisée par un vecplus haut :

Une rotation est cateur dont la direction et le sens donnent l'orientation de l'axe de rotation et le sens de la rotation ; la longueur du vecteur est liée, quant à elle, à la grandeur de la vitesse de rotation.



#### LE PLAN DU PENDULE SEMBLE

 TOURNER EN 24 h AUX PÔLES latitude 90°, sin 90°=1

$$\Rightarrow \omega_{LOCAL} = \omega_{TERRE}$$

$$\Rightarrow T_{PÔLE} = 24 \text{ h}$$

- NE PAS TOURNER À L'ÉQUATEUR latitude 0°, sin 0° = 0
  - $\Rightarrow \omega_{\text{\'eQUATEUR}} = 0 \text{ rad/s}$
  - ⇒T<sub>ÉOUATEUR</sub> = ∞
- TOURNER EN UN PEU PLUS DE 31 h À MONS latitude 50,5°, sin 50,5° = 0,77
  - $\Rightarrow \omega_{\text{MONS}} = \omega_{\text{TERRE}} \cdot 0.77$
  - $\Rightarrow$  T<sub>MONS</sub> = 24 h/0,77 = 31,2 h

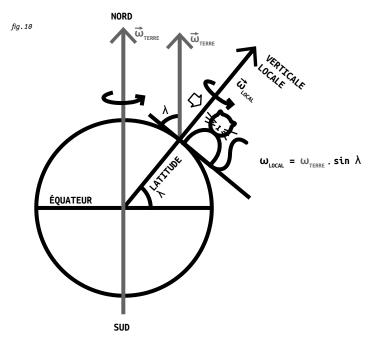


fig. 10

Pour connaître comment un observateur local tourne autour de la verticale locale, il faut projeter le vecteur vitesse angulaire de rotation de la Terre sur le vecteur vitesse angulaire locale. Cette opération fait apparaître le sinus de la latitude du lieu.

#### LA GRANDE QUESTION

Mais le plus extraordinaire reste encore à venir. Car le pendule de Foucault est vraiment une expérience hors du commun, capable de donner le vertige. Certes, c'est l'une des rares expériences qui permettent de mettre en évidence la rotation de la Terre sur elle-même, mais le pendule, c'est bien plus que cela !

Si nous sommes désormais convaincus que le plan d'oscillation d'un pendule reste fixe aux pôles, nous n'avons pas encore répondu à la question essentielle : par rapport à quoi ce plan est-il fixe, si tout bouge dans l'Univers ? En effet, même assis confortablement dans notre fauteuil, alors même que nous pensons être parfaitement immobiles, nous sommes en réalité emportés dans une chorégraphie cosmique qui a de quoi donner le tournis. En effet, même parfaitement calés dans notre fauteuil, nous sommes embarqués par notre planète qui tourne sur elle-même en près de 24 h, tout en gravitant autour du Soleil en un an. Le Soleil est quant à lui en orbite autour du centre de notre galaxie - la galaxie de la Voie lactée - et en boucle une révolution en environ 250 millions d'années, en compagnie de près de 300 autres milliards d'étoiles.

Notre galaxie fait partie - avec la grande galaxie d'Andromède et la Galaxie du Triangle - du *Groupe local*, l'un des composants du super amas de la Vierge qui compte des milliers de galaxies, toutes en mouvements. Les découvertes récentes montrent que ces galaxies se déplacent au sein de *Laniakea* - un gigantesque ensemble composé de plusieurs super amas de galaxies, qui s'étend sur plus de 500 millions d'années-lumière -, en direction d'une région de l'espace baptisée le *Grand Attracteur*. On peut donc bouger sans quitter ses pantoufles !

La question de l'immobilité du plan d'oscillation du pendule aux pôles est donc loin d'être anecdotique.

Pour tenter de répondre à cette question, imaginons-nous toujours au pôle. Relançons le pendule en visant cette fois le Soleil. Dans un premier temps, le plan d'oscillation dérive progressivement par rapport au sol en suivant parfaitement le Soleil dans sa course diurne d'Est en Ouest. Ensuite, le pendule semble se désolidariser peu à peu du Soleil. Le pendule nous montre en quelque sorte que la direction Terre-Soleil n'est pas une direction fixe, puisqu'il



ne suit pas cette direction. Comme nous tournons autour de l'astre du jour, la direction Terre-Soleil tourne donc elle aussi sur elle-même en un an.

Nous pourrions alors choisir un astre beaucoup plus lointain comme cible pour notre pendule polaire, comme l'étoile Bételgeuse par exemple, située à plus 400 années-lumière de la Terre, soit 26 millions de fois plus éloignée de nous que ne l'est notre Soleil. Lancé initialement dans sa direction, le pendule semble la suivre précisément dans son mouvement diurne. Mais ici aussi, après un certain temps, un décalage apparaît entre la direction d'oscillation du pendule et la direction Terre-Bételgeuse… qui ne constitue finalement pas un bon repère : Bételgeuse, comme le Soleil, se déplace dans notre Galaxie. La direction Terre-Bételgeuse n'est donc pas fixe dans l'Univers, et notre pendule idéal le montre!

En fait, pour trouver des cibles par rapport auxquelles le plan du pendule ne bouge pas, il faut aller les traquer aux confins de l'Univers observable, en considérant par exemple les centres de gravité des super amas de galaxies les plus lointains, ceux situés à plus de 10 milliards d'années-lumière. Alors, on peut affirmer que, dans les limites de nos connaissances, un pendule de Foucault installé à l'un des pôles terrestres, lancé en direction de ces astres des confins, ne verrait pas son plan d'oscillation changer d'orientation. Tout au plus, s'agit-il là du meilleur référentiel inertiel que la Physique puisse mettre actuellement à notre disposition.

Le pendule de Foucault qui, à la base n'est qu'une simple expérience de mécanique, réalisée localement avec une boule et un simple câble, semble donc présenter une connexion avec les objets cosmiques les plus lointains. De la mécanique, il nous emporte dans le domaine fascinant et énigmatique de la cosmologie.

Voir
la terre
tourner...
Avec une
roue ?



#### LE GYROSCOPE

Lorsque Léon Foucault prend conscience de l'effet de la latitude sur le comportement de son pendule, il n'est pas très satisfait. Son expérience est certes concluante, elle permet effectivement de voir la Terre tourner, mais ce plan d'oscillation qui tourne en près de 32 h à Paris au lieu des 24 attendues intuitivement le perturbe. Même si cette différence s'explique parfaitement, elle semble heurter le bon sens.

Foucault se remet dès lors au travail. Il cherche toujours une expérience qui puisse prouver la rotation de la Terre, mais de manière plus directe et transparente que celle du pendule. Pour Foucault, l'idéal serait de pouvoir imaginer une expérience qui permettrait de définir une direction supposée fixe… et de la voir pourtant tourner avec une période de 24 heures, quel que soit l'endroit où l'expérience est réalisée sur le globe.

Le physicien français fait encore une fois preuve de toute son ingéniosité. Il développe un instrument mécaniquement très raffiné, qui exploite une étonnante propriété des objets en rotation. N'est-il pas étrange en effet qu'une toupie puisse rester debout, en équilibre sur sa pointe, dès lors qu'elle tourne suffisamment rapidement sur elle-même ? Il en va de même pour un frisbee : un disque lancé simplement, sans avoir été mis en rotation, vole de manière instable, et ne va pas bien loin. Le même disque, lancé en rotation rapide sur lui-même, peut se déplacer sur une très grande distance tout en gardant son assiette parfaitement stable. Les exemples ne manquent pas.

La nature est ainsi faite : un objet en rotation sur lui-même, qui n'est pas perturbé<sup>15</sup>, a tendance à conserver non seulement sa vitesse de rotation, mais aussi la direction de son axe de rotation ! Cependant, les frottements - aérodynamiques ou mécaniques - ralentissent progressivement la rotation, et cette propriété quasi magique disparaît. Dans un monde sans frottement, l'objet tournerait indéfiniment en maintenant son axe de rotation

15

D'un point de vue physique, un objet continue de tourner en conservant fixe la direction de son axe de rotation à condition qu'aucun couple de forces ne lui soit appliqué. Qu'entendt-on par couple de forces? Imaginez un crayon déposé sur une table. Si vous poussez en même temps sur chacune des extrémités, dans la même direction. mais dans des sens opposés, vous appliquez un couple de forces. La somme de ces deux forces est certes nulle, mais l'effet du couple ne l'est pas : il modifie l'état de rotation, puisque le crayon, immobile au départ, se met à tourner.

rigoureusement fixe. Les physiciens parlent de conservation du moment angulaire ou cinétique<sup>16</sup>. Il s'agit d'une des propriétés de conservation essentielles à la Physique, au même titre que la conservation de l'énergie ou de la quantité de mouvement.

Foucault exploite donc cette propriété de conservation de la direction de l'axe de rotation, qui va lui permettre de définir une direction-repère parfaitement fixe, totalement indépendante des mouvements de l'environnement.

Pour arriver à ses fins, il conçoit un dispositif mécanique qui lui permet d'orienter dans n'importe quelle direction un petit disque très massif – *le rotor* –, et ensuite de le faire tourner à très grande vitesse, jusqu'à 150 à 200 tours par seconde, le plus longtemps possible – une dizaine de minutes à l'époque, ce qui est remarquable.

Le système est parfaitement équilibré, de manière à ce que l'axe du rotor ne *précesse*<sup>17</sup> pas, contrairement à celui d'une simple toupie légèrement penchée par exemple. Comme l'objectif de Foucault est de se servir de cette machine pour voir tourner la Terre, le physicien la baptise *gyroscope*, s'inspirant du grec voir tourner.



fig. 10

Pour connaître comment un observateur local tourne autour de la verticale locale, il faut projeter le vecteur vitesse angulaire de rotation de la Terre sur le vecteur vitesse angulaire locale. Cette opération fait apparaître le sinus de la latitude du lieu.

16

Mathématiquement, le moment angulaire est un (pseudo-) vecteur, aligne sur la direction de l'axe de rotation, et dont la grandeur dépend de la forme et de la masse de l'objet, ainsi que de sa vitesse de rotation.

17

Lorsqu'un objet en rotation est soumis à un couple de forces (suite à un mauvais équilibrage par exemple, ou à une influence quelconque de son environnement), il tourne, mais la direction de l'axe de rotation n'est plus alors fixe : elle décrit continuellement un cône, comme le fait une toupie inclinée par exemple. C'est un mouvement de précession. Si la Terre, en rotation sur elle-même, n'est pas soumise à des frottements extérieurs. elle subit l'influence gravitationnelle du Soleil, de la Lune, et dans une moindre mesure, des autres planètes : la direction de son axe de rotation précesse suivant un cycle d'environ 25 600 années ; ce phénomène est à l'origine de ce que l'on appelle la précession des équinoxes.



Le principe de l'expérience est le suivant. Foucault choisit une orientation quelconque pour le rotor, qui est alors mis en rotation rapide. Les lois de la mécanique enseignent que cette direction reste immuable, comme verrouillée par rapport aux systèmes galactiques les plus lointains.

Or, en observant de près le disque en rotation, et en mesurant finement son orientation au cours du temps, Foucault constate que l'axe de rotation du rotor dévie progressivement d'Est en Ouest. En dix minutes d'observation, il obtient suffisamment de mesures pour en déduire que la direction de l'axe de rotation ne reviendra dans son orientation initiale qu'après 23 heures et 56 minutes...

La conclusion est donc implacable : la rotation observée n'est pas celle de l'axe de rotation du gyroscope lui-même, mais bien celle de la Terre, qui tourne d'Ouest en Est !

Foucault tient enfin son Graal, l'expérience tant recherchée! Contrairement au pendule, le gyroscope utilisé à Paris, à Mons, aux pôles ou à l'équateur, montre directement que la Terre tourne bien sur elle-même en un peu moins de 24h.

Par la suite, ce gyroscope, conçu pour voir la Terre tourner, aura une destinée extraordinaire et de bien nombreux descendants. Les gyroscopes permettent de définir des directions de référence, immuables, indispensables pour l'orientation en mer, dans les airs, ou dans l'espace. Aujourd'hui, notre monde ne tournerait pas rond sans les gyroscopes, même si certains gyroscopes modernes fonctionnent sur des principes différents de celui créé par Foucault.

### TROUVER LE NORD, SANS BOUSSOLE?

Le gyroscope se révèle être un instrument des plus extraordinaires, aux propriétés surprenantes, ouvrant la voie à une troisième expérience qui permet de voir tourner la Terre.

En travaillant sur son gyroscope, Foucault découvre un phénomène étonnant. Le rotor, dont le cardan intérieur a été préalablement bloqué, une fois mis en rotation, ne conserve pas sa direction : le disque se met à pivoter autour de la verticale, puis à osciller légèrement avant de s'immobiliser, dans une direction, toujours la même... celle du Nord géographique ! Pour la première fois, un système totalement mécanique permet de retrouver le Nord, sans faire appel au magnétisme terrestre ! Le physicien vient donc de découvrir le moyen de réaliser une boussole non pas magnétique mais mécanique : le gyrocompas. Les études ultérieures montreront qu'un gyrocompas - c'est-à-dire un gyroscope dont on a volontairement bloqué l'un des axes - tend à aligner son seul axe de rotation libre avec celui de la planète. Si la Terre ne tournait pas, le gyrocompas ne modifierait pas sa direction initiale de rotation : l'orientation vers le Nord du gyrocompas est donc une preuve supplémentaire de la rotation de notre planète autour d'un axe Nord-Sud<sup>18</sup>.

Cette découverte inattendue aura des implications de premier ordre dans la navigation. En effet, dans les navires à coque métallique, l'utilisation des boussoles magnétiques peut poser problème. Il est donc essentiel pour les marins de déterminer la direction du Nord sans faire appel au magnétisme terrestre. Le gyrocompas est la solution, pour autant que des modèles portables, fiables, capables de fonctionner quasi en permanence, soient mis au point. Le défi est de taille, mais sera brillamment relevé par Hermann Anschütz-Kaempfe en 1906 en Allemagne, et en 1908 aux États-Unis par Elmer Ambrose Sperry.

#### SUIVRE LA ROTATION DE LA TERRE, POUR QUOI FAIRE ?

La quête de la preuve ultime de la rotation de la Terre aura été une fantastique aventure humaine et intellectuelle, longue de vingt-cinq siècles, parsemée parfois de drames mais aussi de réalisations de génie. Nous pourrions en rester là. Pourtant aujourd'hui, l'étude de la rotation de la Terre est devenue une discipline à part entière, car contrairement à ce que d'aucuns pensent, la rotation de la Terre n'est pas rigoureusement constante, que ce soit en grandeur ou en direction. L'étude de ces variations est essentielle, et ne passe bien entendu plus par l'utilisation de pendules ou de gyroscopes. Le niveau de précision à atteindre dépasse l'entendement!

18

Ces étranges phénomènes liés aux rotations peuvent être mis en évidence avec une simple roue de vélo. Tenez entre vos mains une fourche de vélo, orientée dans le plan horizontal; la roue se trouve donc dans le plan vertical. Faites tourner la roue : son axe de rotation est donc horizontal. Si vous tournez sur vous-même, vous constaterez que la fourche bascule progressivement: la roue en rotation passe du plan vertical à celui horizontal : l'axe de rotation de la roue s'est aligné avec l'axe de rotation du système vous !. Cette expérience a été proposée par Andre Lausberg (astrophysicien, ULiège).



De par le monde, en utilisant les technologies les plus avancées – exploitation des données de type GPS, interférométrie radio à longue base… – des équipes de scientifiques mesurent quotidiennement les variations fines de la vitesse de rotation de la Terre, ainsi que les variations de la direction de son axe de rotation. Ainsi, la position des pôles géographiques évolue continûment, se déplaçant de quelques dizaines de mètres par jour, décrivant de curieuses trajectoires.

Quant à la durée du jour, elle fluctue quotidiennement de quelques millisecondes, et s'allonge en moyenne de une à deux millisecondes par siècle : suite à la présence de la Lune, la rotation de la Terre ne cesse de ralentir. Ainsi, il y a 400 millions d'années, la journée ne comptait que 22 heures. Des mouvements complexes, à moyens et à plus longs termes, affectent également la rotation de la planète. Certains sont périodiques et bien compris, comme la précession dont il a déjà été question ici, ou encore certaines nutations. D'autres effets ne sont toujours pas complètement élucidés.

En fait, tout comme la rotation sur lui-même d'un œuf peut nous laisser deviner s'il est cuit ou cru, la façon dont la Terre tourne sur elle-même nous renseigne sur son intérieur profond, totalement inaccessible<sup>19</sup>. Cette rotation dépend des mouvements des fluides à l'intérieur du globe, mais aussi des fluides qui l'enrobent, comme les océans et l'atmosphère. Même le relief de la Terre et l'activité solaire entrent en ligne de compte ! Le problème est effroyablement complexe. Cependant, son étude est d'une richesse insoupçonnée, car elle permet de construire des modèles de structure de l'intérieur du globe.

Aujourd'hui, ce n'est plus seulement la rotation de la Terre qui est étudiée, mais aussi celles des autres planètes, comme Mars ou Vénus.

## Le pendule de Waudru



#### 2005 UNE ANNÉE MÉMORABLE

L'idée de reproduire à Mons la célèbre expérience du pendule de Foucault émerge en 2004. À cette époque, les physiciens de l'Université préparent activement leur programme d'activités pour célébrer 2005, l'Année internationale de la Physique.

Et quel plus bel écrin pour accueillir le prestigieux pendule que la collégiale Sainte-Waudru ?

Deux techniciens compétents et motivés, Jean-Pierre Toubeau et Jean Minez, acceptent de relever le défi et de construire sur mesure le pendule rêvé par les physiciens.

#### UN SYSTÈME DE SUSPENSION SPÉCIFIQUE AUX COMBLES DE LA COLLÉGIALE

À l'époque, un premier problème de taille se pose : comment fixer l'attache du pendule à la voûte de la Collégiale ? Un premier tour de reconnaissance sur les lieux nous permet de remarquer la présence de trous régulièrement disposés le long de la voûte - nous apprendrons plus tard que ces ouvertures servaient probablement à suspendre des chandeliers. Ces ouvertures semblent prédestinées : nous choisissons l'ouverture située non loin du célèbre Car d'Or. Petite vérification depuis les combles : à cet endroit, le passage au travers de la voûte est toujours bel et bien libre !

de suspension proprement dit. L'idée est donc de le fixer à la charpente sans y forer le moindre trou. C'est que l'édifice du XVe s. est classé au patrimoine majeur de Wallonie !

Jean-Pierre et Jean imaginent alors une structure composée de deux poutres horizontales, longues de trois mètres, qui sandwicheront, à environ 1,60 m au-dessus de la voûte, deux poutres verticales de la charpente. Cet assemblage permet alors de supporter un grand U en bois, dont la base, percée d'un trou, épouse la voûte précisément à l'endroit où se trouve l'ouverture circulaire.

La deuxième pièce maîtresse du dispositif est celle qui permet de connecter le câble du pendule à la structure en U. Cette pièce a la forme d'un T : elle est en effet formée d'un cylindre métallique vertical et d'une plaque métallique horizontale. Le cylindre métallique est creusé d'un fin

Ensuite se pose la question du dispositif canal à peine plus large que le câble luimême. C'est par ce canal que le filin est inséré au travers du cylindre. Le filin ressort en haut du dispositif, au niveau de la plaque métallique qui forme la partie horizontale du T. À cet endroit, un petit système permet de le fixer, tout en offrant la possibilité d'ajuster finement la longueur du câble qui oscillera dans la collégiale.

> Le fin canal qui traverse le cylindre permet de confiner le câble. Sa sortie basse est évasée pour que le fil, lors de ses innombrables allers-retours, ne soit pas abîmé. Il permet donc au câble de se mouvoir librement, sans jamais toucher la voûte et sans induire de direction privilégiée dans le mouvement. Le cylindre est ensuite installé au travers de la voûte - épaisse d'environ une cinquantaine de centimètres. On peut alors faire descendre le câble à l'intérieur de la nef afin d'y fixer, dans un second temps, la sphère.

fig. 12



fig. 12 À Mons, la prestigieuse collégiale Sainte-Waudru, avec sa nef culminant à près de 25 mètres, est le site idéal pour accueillir un pendule de Foucault : la présence de nombreux trous dans la voûte semble même la prédestiner à cette expérience !

fig. 13



fia. 13 Deux poutrelles horizontales sont « sandwichées » sur les poutres verticales de la charpente ; ce sont elles qui supportent le dispositif d'attache du pendule. Cette technique permet d'éviter de forer des trous dans la charpente.

fig. 14



Mise en place du dispositif en U, entre les deux poutrelles horizontales. Le trou circulaire à la base du U se positionne précisément au-dessus d'une des ouvertures qui traverse la voûte.

## LE PENDULE DE WAUDRU

#### UN CÂBLE, **UN BALANCIER**

La sphère originelle, qui sert de balancier, est utilisée de 2005 à 2015. Elle est en acier, présente une masse 42 kg et un diamètre de 22 cm. La forme sphérique permet de minimiser les frottements aérodynamiques. La masse imposante permet de limiter les effets parasites des courants d'air par exemple.

Le choix du câble est lui aussi important. Faut-il utiliser un câble monobrin, multibrin, torsadé ? Après en avoir discuté avec l'équipe d'André Lausberg, astrophysicien liégeois qui a installé de nombreuses fois un pendule dans l'ancienne église Saint-André à liège, le choix se porte sur un câble torsadé, composé d'acier galvanisé, de deux millimètres de diamètre et capable de soutenir 225 kg, soit bien plus que le masse de notre balancier, sécurité avant tout.

L'autre extrémité du câble, celle qui est fixée à la sphère, traverse une grosse vis au-delà de laquelle elle est bloquée par un nœud soudé. L'ensemble est ensuite vissé sur le sommet de la sphère.

#### LES PREMIERS TESTS

Les premiers tests sont plus que concluants. Ils montrent clairement une dérive réqulière du plan d'oscillation, correspondant parfaitement aux prévisions théoriques : le plan de notre pendule tourne dans le bon sens, celui des étoiles et du Soleil. de 5° en 26 minutes. Il effectue un tour complet en 31 heures - Mons n'est pas au pôle, le plan du pendule ne tourne donc pas en 24 heures.

L'engouement du public et des médias est exceptionnel. En deux semaines, près de 3500 personnes viennent voir la Terre tourner à la collégiale !





La pièce métallique en T qui traverse la voûte est maintenant Pour une sécurité maximale, le fil retenu pour le en position à la base du U.

fig. 16



pendule de Sainte-Waudru est un câble d'acier torsadé de 2 mm de diamètre.







fig. 17

fig. 17 La sphère est dotée d'une pointe permettant de faire tomber des bouchons de liège, au fur et mesure de la rotation de la Terre. On distingue sous le pendule, le grand disque en bois sur lequel a été gravée une rose des vents, ainsi que la phrase de Foucault devenue célèbre « Vous êtes invités à venir voir tourner la Terre ».

#### **AU FIL DES ANNÉES**

En 2011, un nouveau plateau en bois est réalisé, qui reprend une très élégante rose des vents, ainsi que la légendaire invitation de Léon Foucault : « Vous êtes invités à venir voir tourner la Terre ».

L'engouement du public est encore au rendez-vous : 5 500 visiteurs viennent nous rejoindre lors des visites guidées !

En 2013, le pendule est installé un mois durant, cette fois dans la nef romane de la très prestigieuse cathédrale Notre-Dame de Tournai.

En 2015, le pendule montois fait son retour dans la collégiale Sainte-Waudru alors que Mons est déclarée, pour un an, Capitale culturelle de l'Europe. Pour la première fois, le pendule oscillera durant deux mois. Plus de 70 visites guidées seront organisées, la plupart en français, mais aussi en anglais. Près de 7000 visiteurs viendront voir la Terre tourner.

### 2018 : UN TOUT NOUVEAU PENDULE

Un incroyable fait divers se produit en 2015. La sphère et le dispositif en T sont dérobés lors du rapatriement du dispositif de la Collégiale vers l'Université.

Face à l'adversité, l'ami Jean - déjà à la retraite depuis près de 10 ans - fait contre mauvaise fortune bon cœur, et imagine le pendule du futur : la version 2.0 de l'expérience est en marche !

Jean propose de remplacer la simple sphère d'acier par une « sphère » en inox. Sa conception est vraiment originale et le résultat particulièrement élégant : la « sphère » est constituée de 43 disques de diamètres différents allant de 38 mm à 228 mm. Ces disques, découpés au laser, sont enfilés - du plus petit au plus grand pour la partie inférieure de la sphère, et du plus grand au plus petit pour la partie supérieure - sur une tige filetée qui les maintient alignés.



Jean réalise au tour une magnifique pièce conique qui permet d'élégamment relier le disque inférieur de la sphère à la grande pointe, celle qui fait tomber les bouchons au fur et à mesure de la rotation de la Terre. La masse de ce nouveau balancier est de 44 kg.

Jean retravaille l'ensemble pour en supprimer toutes les aspérités, parfaire son équilibre, et le rendre éclatant. Il en extrait près d'un demi-mètre cube de copeaux d'acier!

Jean reconstruit ensuite la totalité du dispositif en T, en y apportant de subtiles modifications mécaniques. Les tests grandeur nature du pendule 2.0 ont lieu dans la Collégiale en 2016. Les résultats montrent que le mouvement du nouveau pendule est d'une qualité nettement supérieure à celle de l'ancien. En 2017, fig. 18 Jean apporte également des améliorations au système en U afin d'améliorer la rigidité de l'ensemble. Tout est fin prêt pour l'édition 2018.

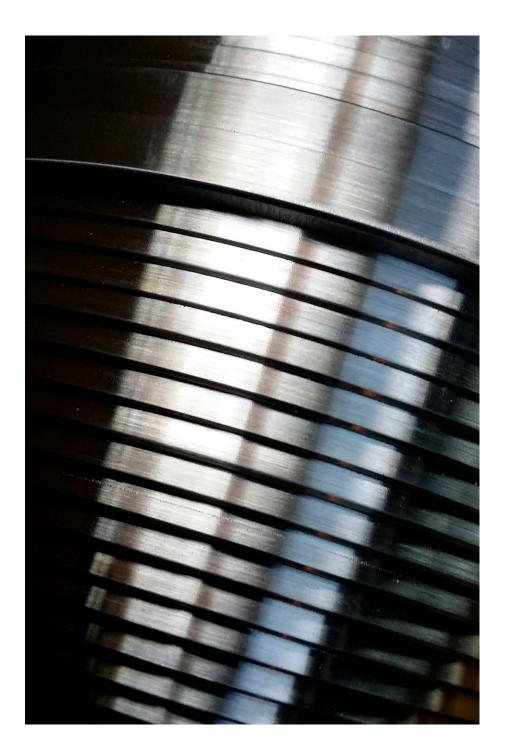
fig. 19
La structure du nouveau balancier a été conçue par Jean
Minez, technicien retraité de
l'OMONS. Jean a dès le départ
imaginé une zone équatoriale
plus large afin de faciliter les
opérations de lancement. On
distingue aussi la structure conique qui assure une transition
harmonieuse entre la sphère et
la pointe.

fig. 18
Quelques-uns des 43 disques en
acier inoxydable qui composent
désormais le balancier du
nouveau pendule de Foucault de
l'UMONS.



fia. 18

alerege \$ 12





#### AUTOUR DU PENDULE, DES EXPÉRIENCES QUI CHAMBOULENT LE SENS COMMUN

#### La manège de Coriolis

L'événement proposé par l'UMONS ne se limite pas en une simple démonstration du pendule de Foucault. Différentes expériences, a priori très simples, remettent en question bien des préconceptions. Chaque séance permet ainsi de retracer le cheminement historique qui a permis d'arriver à cette idée, si familière aujourd'hui, d'une Terre ronde qui tourne sur ellemême. Le pendule lui-même n'est pas qu'un aboutissement, mais aussi un point de départ pour de nouvelles questions, par une ouverture aux grandes questions de la physique d'aujourd'hui.

Parmi les expériences proposées, citons par exemple :

#### Un petit manège

Composé d'une table et de deux chaises installées sur une plateforme tournante, il constitue l'une des clés du dispositif expérimental. Ce dispositif permet de mettre en évidence le fameux effet Coriolis, au cœur de la compréhension du pendule de Foucault. Deux « cobayes » prennent place sur le manège qui est ensuite mis en rotation. Ses passagers se lancent une balle, jouent avec un petit pendule, etc. Des caméras permettent de visualiser ce qu'ils voient et de le comparer avec ce que voient les spectateurs qui ne sont pas montés sur le manège. Le résultat est troublant : selon que l'on tourne ou pas par rapport à la collégiale, le mouvement de la balle ou du mini-pendule nous semble totalement différent : les passagers voient systématiquement la balle et le pendule décrire des trajectoires courbes, alors que les spectateurs extérieurs voient la balle et le pendule suivre rigoureusement des lignes droites! Cette expérience est le point de départ de toute la réflexion qui permet de comprendre le rôle du pendule de Foucault.

#### Un pendule incliné

Afin de permettre aux visiteurs de visualiser l'effet de la latitude sur le mouvement du pendule, l'équipe a développé un mini-pendule inclinable : résultats totalement anti-intuitifs !

#### Une tige oscillante

De même, les visiteurs peuvent découvrir l'expérience historique qui a permis à Léon Foucault de comprendre que la rotation du point d'attache du pendule – suite à la rotation du bâtiment avec la Terre est sans effet aucun sur le mouvement du pendule. Ici aussi, l'expérience donne des résultats totalement anti-intuitifs.

#### Les 15 pendules

Et juste pour le plaisir des yeux, un dispositif très élégant permet d'observer simultanément les mouvements de 15 pendules de longueurs différentes, judicieusement choisies... Le résultat visuel est des plus étonnants.

# Science fiction



" Prolongements, un peu de science-fiction ? "

#### **ET SI LA TERRE TOURNAIT PLUS** VITE?

plus rapidement ?

si elle tournait précisément 17 fois ber, par exemple suite à une rupture plus rapidement qu'actuellement ! À du câble, nous tomberions avec lui, cette vitesse, nous aurions l'im- en ayant l'étrange sensation d'être pression de ne plus être soumis à en apesanteur le temps de la chute. notre propre poids et de vivre en Or, si nous tombons, c'est que nous apesanteur ! Tous les objets qui sommes emportés par notre poids, nous entourent resteraient à l'en- mais dans ce cas, notre poids appadroit où nous les déposerions, même rent. le poids que nous ressentons sans support : un manteau resterait est nul. suspendu comme par miracle à un portemanteau inexistant. Une bouteille C'est un peu ce qui se passerait d'eau flotterait dans les airs en si la Terre tournait 17 fois plus l'absence de toute table. Et nous, vite, l'accélération que nous resnous vivrions comme des astronautes sentirions suite à la rotation de en orbite !

Pour le comprendre, il suffit de se rappeler ce qui se produit lorsque nous prenons l'ascenseur. Lorsque Dans cette situation, la Terre tour-Alors qu'à l'inverse, lorsque l'as- torrentielles, etc. censeur entame sa descente, durant la phase où la vitesse varie, nous avons l'impression d'être plus léger, de peser moins.

Que se passerait-il si la Terre Notre poids réel n'a jamais chantournait sur elle-même beaucoup gé, mais bien notre poids apparent qui dépend de l'accélération que nous subissons. Ainsi, si l'ascen-Un phénomène étonnant se produirait seur se mettait subitement à tom-

> notre monde serait telle que nous ne ressentirions plus aucun poids apparent!

l'ascenseur commence à monter, du- nant tellement vite, les jours et rant la courte phase de mise en les nuits se succèderaient à une vimouvement vers le haut, nous avons tesse folle. La météo deviendrait l'impression d'être poussés vers le bien plus rude, avec des vents et sol, de peser plus que notre poids. orages très violents, des pluies

## ET SI LA TERRE... NE TOURNAIT PLUS ?

Que se passerait-il si la Terre cessait de tourner sur elle-même ? Contrairement à une idée reçue, nous ne serions pas en apesanteur.

Les durées du jour et de la nuit seraient quant à elles bien différentes, puisque l'alternance jour/ nuit ne serait plus liée à la rotation de la planète sur elle-même en 24 h, mais bien à la révolution de la Terre en un an autour du Soleil!

Et si la Terre s'arrétait de tourner, la « force centrifuge²º » disparaîtrait, et avec elle le bourrelet équatorial. L'eau des océans se déplacerait alors vers les zones de plus grande gravité, les pôles. De nouvelles terres apparaîtraient donc au niveau de l'équateur et d'autres disparaîtraient, englouties, au niveau des pôles. Une grande partie de l'Europe disparaîtrait et seules certaines chaînes de montagnes émergeraient des flots. La carte du monde en serait profondément modifiée!

#### Légende urbaine autour d'un lavabo

« C'est à cause de la force de Coriolis que les lavabos se vident dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud, dans le sens trigonométrique dans l'hémisphère Nord, et, comme chacun peut le constater, ne se vident pas à l'équateur ».

Ainsi plaisantait un professeur de Physique qui désirait tordre le cou à cette idée selon laquelle les lavabos se vident dans des sens différents selon l'hémisphère. Les dimensions sont trop petites et le temps d'écoulement trop court pour que la force de Coriolis ait le temps d'influencer le mouvement de l'eau ! La Terre tourne trop doucement pour que sa rotation puisse avoir un effet réel sur l'écoulement de l'eau dans le lavabo. Tout dépend de la vitesse de l'eau au moment où le bouchon est enlevé et de la facon dont on enlève le bouchon.

20

La notion de force centrifuge est à manipuler avec précaution, cf. article sur le pendule lui-même. Cette force n'est que fictive.

#### COMMISSAIRE

Francesco Lo Bue

#### ASPECTS TECHNIQUES

Conception et réalisation du dispositif de suspension Jean-Minez Jean-Pierre Toubeau

#### Conception et réalisation du pendule

Jean Minez

#### Installation et maintenance

Jean Minez Christophe Saussez

#### **GROUPES DE TRAVAIL**

#### Aspects scientifiques et didactiques

Nicolas Boulanger Sébastien Delangre Maxime Duménil Pierre Gillis Yves Gossuin Francesco Lo Bue Soizic Mélin Francis Michel Claude Semay Philippe Spindel Dominique Wynsberghe

#### Rédaction du livret Francesco Lo Bue

Francesco Lo Bue Soizic Mélin Claude Semay

#### Développement des expériences connexes

Michaël Baele Charles Cabre Thierry Descamps Michel Fievez Bernard Foucart Jean Minez Soizic Mélin Alessandro Randazzo Thomas Peteau Jean-Pierre Toubeau Christophe Saussez

#### Soutien audiovisuel

Plorian Darcheville
David Paolini
Marc Rosoor
Guillaume Vantomme
Frnesto Zarco

#### ASPECTS GRAPHIQUES

Ex Nihilo
Adaptations graphiques
& conception graphique
du livret
Camille Bauvois
Charlotte Langohr

#### IMPRESSIONS

Septembre 2018 500 exemplaires Presses Universitaires UMONS - Plaine de Nimy 7000 - Mons

#### SOUTIEN FINANCIER

Direction Générale Opérationnelle de l'Économie, de l'Emploi et de la Recherche (DGO6) — Service Public de Wallonie (SPW) Université de Mons (UMONS)

#### EN PARTENARIAT AVEC

LA FABRIQUE D'ÉGLISE SAINTE-WAUDRU

#### CRÉDIT

fig. 11

François Arago, Astronomie populaire, Tome 3, 1856













