

LE PENDULE DE FOUCAULT

COLLÉGIALE SAINTE-WAUDRU MONS, 2015















C'est alors que je vis le Pendule. La sphère, mobile à l'extrémité d'un long fil fixé à la voûte du chœur, décrivait ses amples oscillations avec une isochrone majesté.

Umberto Eco, Le Pendule de Foucault

SOMMAIRE

Préface ☞ Calogero CONTI (UMONS)	08
Introduction ☞ Francesco LO BUE (UMONS)	10
Voir la Terre tourner Francesco LO BUE (UMONS)	12
La Terre : sphère ou disque ? Hossam ELKHADEM (ULB)	34
Lorsque Galilée inventait la Physique ☞ Pierre GILLIS (UMONS)	44
Les contributions de Léon Foucault à la science et aux techniques	57
Le pendule de Foucault : un peu de théorie Pierre GILLIS, Francesco LO BUE & Soizic MÉLIN (UMONS)	85
Pendule et grandeurs physiques Claude SEMAY (UMONS)	95
Rotation de la Terre et météo ☞ Fabian Debal (IRM), Francesco LO BUE & Soizic MÉLIN (UMONS)	99
Le grand héritage des chanoinesses : autour du pendule, la collégiale Maxime DUMÉNIL & Francesco LO BUE (UMONS)	105
Dans les coulisses du pendule de Waudru Francesco LO BUE (UMONS)	121
Et si la Terre tournait plus vite ? Claude SEMAY (UMONS)	128
Et si la Terre cessait de tourner ? Francesco LO BUE (UMONS)	131
Le Pendule : la vision d'un homme de lettres Fabien BUISSERET (UMONS)	134
Remerciements Francesco LO BUE (UMONS)	140
Colophon	142

PRÉFACE

CALOGERO CONTI

« *Vous êtes invités à venir voir tourner la Terre...*», tels sont les mots, libellés dans un style volontairement énigmatique, utilisés par le physicien et ingénieur français Léon Foucault en 1851 afin de susciter l'intérêt de ses contemporains.

L'hypothèse de rotation de la Terre autour de son axe avait certes déjà été évoquée dans l'Antiquité par des astronomes grecs pythagoriciens. Mais il manquait de preuves expérimentales évidentes pour tous les Terriens, des preuves basées sur des expériences visuelles, accessibles à tous. Ces preuves étaient en fait à l'époque, essentiellement externes et s'appuyaient sur l'observation des planètes et des étoiles.

Ce n'est que bien plus tard que des preuves internes du mouvement de la Terre sur elle-même ont pu être obtenues grâce à la mesure d'effets dus à la rotation de notre planète sur des phénomènes simples, tels que la chute d'une masse ou les oscillations d'un pendule. La plus évidente de ces preuves, c'est bien Léon Foucault qui l'a apportée en 1851 en mettant en action son fameux pendule, d'abord installé à l'Observatoire de Paris puis au Panthéon.

Peu de scientifiques auront comme lui pu connaître un tel succès de foule en mettant leur découverte à disposition du grand public. Maintes fois répétée, et à notre époque organisée en permanence dans plusieurs villes du monde, l'expérience de Foucault ne cesse d'intriguer et de fasciner les spectateurs.

Le matériel utilisé est pourtant d'une étonnante simplicité: une sphère suspendue à un câble. Mais alors que nous-mêmes sommes entraînés par le mouvement du sol, voici que la trajectoire du pendule est déviée comme si la masse oscillante était davantage reliée aux étoiles qu'à notre planète. On se sent vite tout petit devant ce mouvement inattendu en pressentant qu'une loi mystérieuse s'applique devant nos yeux. La rotation du plan dans lequel oscille le pendule ne peut s'expliquer que parce que la Terre s'obstine à tourner sur elle-même, et ce, depuis plusieurs milliards d'années.

Aujourd'hui, l'invitation à voir la Terre tourner reste toujours aussi captivante. Si le pendule ne constitue plus une exclusivité, sa découverte s'impose à quiconque s'intéresse au phénomène de la rotation de la Terre sur elle-même.

Des physiciens, ingénieurs et techniciens de divers services de l'Université de Mons se sont groupés pour la faire revivre au sein de la collégiale montoise Sainte-Waudru, avec un pendule long de 25 mètres. Je les en remercie ainsi que les collègues d'autres institutions qui ont apporté leur contribution à cet ouvrage, publié en marge de l'événement.

Du 29 janvier au 29 mars 2015, l'occasion est ainsi donnée au public de voir le pendule de Foucault battre la mesure; son plan d'oscillation effectuant une rotation inexorable autour de l'axe vertical en environ 31 heures, dans le sens des aiguilles d'une montre, au rythme constant de près de 11 degrés par heure.

Chacun pourra ainsi prendre conscience que la réalité est beaucoup plus complexe que ce que nos sens nous permettent d'appréhender, car cette preuve de la rotation de la Terre n'est pas anodine. Elle est la constatation de notre permanente mobilité, l'invitation à oser surmonter l'illusion de nos perceptions, car qui peut imaginer qu'à la latitude de Mons, nous sommes entraînés, sans nous en rendre compte, à une vitesse de l'ordre de 290 m/s dans le mouvement de révolution quotidienne que fait notre planète sur elle-même !

~ 08 × 09 × m

Introduction

FRANCESCO LO BUE (UMONS)

À Mons, en 1450, un immense chantier s'ouvre sur la colline de Waudru. Trente femmes de pouvoir, les chanoinesses, sont sur le point de réaliser leur rêve le plus fou : élever pour elles seules une église grandiose, digne des plus belles cathédrales européennes, un monument démesuré destiné à défier le temps et les hommes.

Un siècle s'est écoulé depuis l'inauguration du chantier. Le chœur de l'église est terminé, les maîtres-maçons s'affairent désormais à finaliser la majestueuse nef gothique. À Nuremberg, un livre révolutionnaire sort de presse : un chanoine polonais ose bousculer l'ordre établi depuis des millénaires. Et si la Terre n'était pas le centre de l'Univers ? Et si elle tournait sur elle-même ? Les années passent, l'évolution des idées est en cours, le chantier se poursuit. Les chanoinesses se sont fixées quant à elle un nouvel objectif : offrir à leur collégiale une tour vertigineuse, la plus haute jamais construite par l'homme. Objectif : atteindre le ciel et toucher les étoiles.

En ce début de XVII^e siècle, le ciel est plus que jamais au cœur de toutes les préoccupations. Un savant florentin observe la Lune et les planètes avec un instrument d'un genre nouveau. Les découvertes sensationnelles se bousculent, l'Univers connu est en train de basculer. Le Toscan annonce haut et fort, au risque de brûler sur le bûcher, que le chanoine polonais avait raison.

En 1687, la tour des chanoinesses est encore en construction lorsqu'à Londres, un mathématicien alchimiste dévoile au monde les rouages secrets de la mécanique céleste. La Terre n'est clairement pas le centre du monde, et elle tourne sur elle-même. Même si personne n'est encore capable de le prouver directement. Quatre ans plus tard à Mons, le chantier de la tour s'interrompt définitivement, à trente mètres au-dessus du sol.

Paris, mars 1851. Un expérimentateur de génie convie le public au Panthéon pour y voir tourner la Terre : un pendule – une ficelle et une boule – suffit pour

la démonstration... À Mons, les chanoinesses ont perdu leur pouvoir, anéanti par les révolutionnaires. La collégiale n'est plus l'église privée isolée du monde par un mur d'enceinte. Le 12 juin⁰¹, un pendule y est installé. Si le prestigieux édifice n'a pas permis de toucher le ciel, il permet désormais de le comprendre.

Mons, an de grâce 2015. L'Europe a fait de la cité de Waudru sa capitale culturelle: spectacles éblouissants, démonstrations technologiques, fêtes étour-dissantes,... Mais dans l'église des chanoinesses, le silence règne toujours en maître. Isolée de la frénésie du monde moderne, une sphère métallique, suspendue à la voûte gothique par un câble long de 25 mètres, fend l'air froid, lentement, dans un majestueux mouvement de va-et-vient. Telle une révélation, la rotation de notre monde devient alors une évidence. Et peut-être qu'au pied de la tour inachevée, en tendant l'oreille, perdus parmi les derniers échos des bâtisseurs, vous entendrez les murmures fascinants et fascinés de Copernic et de Galilée...

Le pendule de Foucault est de retour dans la collégiale Sainte-Waudru : vous êtes invités à venir voir tourner la Terre.

⁰¹ À Mons, la première installation d'un pendule de Foucault précède de quelques jours celle du 12 juin 1851. Elle est l'œuvre d'un ingénieur diplômé de l'École des Mines, Louis Parez (1821-1870), professeur de mathématiques et directeur de l'École moyenne de l'État à Mons de 1864 à 1870. Ce premier pendule de Foucault montois a été installé à la Chapelle du Dépôt de Mendicité – aujourd'hui intégrée au Conservatoire Royal de Mons.

VOIR LA TERRE TOURNER

FRANCESCO LO BUE (UMONS)

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 peut-il 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 $24\,h^{02}$ 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 !

QUI BOUGE ? LA GARE OU LE TRAIN ?

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'Est⁰³. 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.

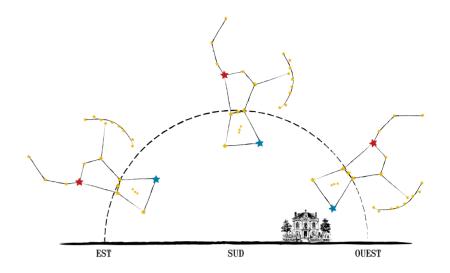


fig. 01

Les étoiles, comme celles de la constellation d'Orion représentée ici, 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 mouvement d'ensemble de la voûte céleste.

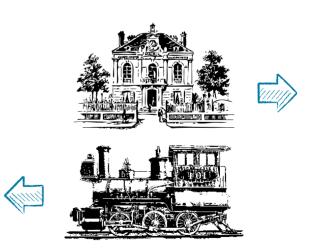


fig. 02

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?

⁰² En réalité, la Terre boucle une rotation sur elle-même en 23 h 56 min par rapport aux étoiles.

⁰³ Rigoureusement, le Soleil ne se lève exactement à l'Est qu'aux moments des équinoxes de printemps et d'automne. 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..

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 millénaires⁰⁴!

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 elle-même, 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 xr^e 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!

Par contre, Johan Kepler comprend, après avoir étudié minutieusement les mesures prises pendant des décennies par Tycho Brahé, 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 deux foyers⁰⁵. 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 Vénus⁰⁶ 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 ».

⁰⁴ En effet, ce modèle permet de prévoir, avec une relative précision, les mouvements apparents des étoiles, des cinq planètes visibles à l'œil nu, de la Lune et du Soleil!

Pour construire un cercle, on a besoin de connaître son centre et son rayon. 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.

Observée depuis la Terre au travers d'un instrument d'optique, la planète Vénus, 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 Vénus, 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 par le modèle héliocentrique.

LE PENDULE DE GALILÉE

Alors, comment prouver que la Terre tourne bien sur elle-même ? 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.

Mais 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 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 ⁰⁷. Mais qui, le premier, a étudié le pendule ?

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 Pise⁰⁸. Il observe un fait étrange : lorsque le lustre se balance au bout de son câble, il met approximativement toujours le même temps⁰⁹ 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 fil¹0 : 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. Cette dernière propriété, *a priori* anodine, constitue la clé du pendule de Foucault.

Quittons la Toscane du xVII^e siècle et, rejoignons le Paris du XIX^e : 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 été menées auparavant pour traquer les signes éventuels de cette rotation. Mais quels effets faut-il chercher ? Pour le comprendre, allons à la foire...

TOURNE, TOURNE LE MANÈGE

L'idée est la suivante : imaginez des enfants installés sur les chevaux de bois d'un carrousel de foire. Un de ces jeunes cavaliers désire lancer une balle à un autre cavalier. Il le vise, et lui lance la balle. Si le manège ne tourne pas et que le premier enfant a bien visé, la balle se déplace naturellement en ligne droite et atteint sa cible. Par contre, si le carrousel tourne, la balle, qui se déplace toujours naturellement en ligne droite¹¹, ne parvient pas à atteindre sa cible, car au moment où elle aurait dû la toucher, l'autre cavalier n'est plus là, emporté par la rotation en un autre endroit! Le phénomène curieux, mais logique, est que les deux cavaliers voient la balle être systématiquement déviée... Cette déviation, dite de Coriolis, n'apparaît que pour les enfants qui sont sur le manège. Nous dirons que la déviation est apparente pour les cavaliers (comme on parle du mouvement apparent du Soleil et des étoiles dans le ciel). Pour les personnes qui observent la scène depuis la place du village, à l'extérieur du carrousel, la déviation n'existe pas : la balle se déplace en ligne droite.

Les cavaliers peuvent interpréter cette déviation de deux façons différentes. Soit ils se disent : « nous voyons la balle dévier parce qu'une force agit sur elle », soit ils

⁰⁷ Comme par exemple, la description quantique des particules élémentaires et de leurs interactions.

⁰⁸ 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.

⁰⁹ Il semble que Galilée mesurait la période des pendules en se servant de son pouls.

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.

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

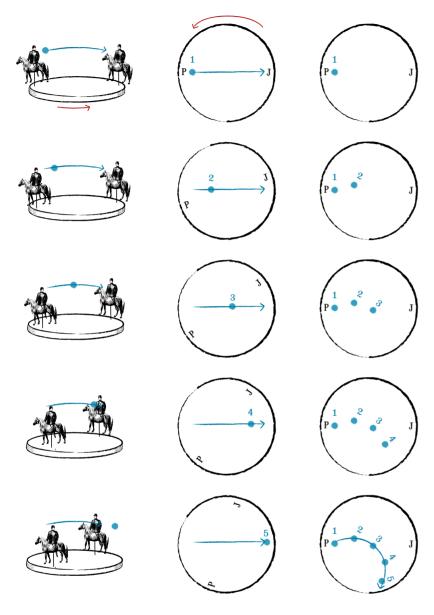


fig. 03

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 manège 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 chevaux de bois. La balle, qui se déplace réellement en ligne droite, semble suivre une trajectoire courbe lorsqu'elle est observée depuis le manège (référentiel en rotation). La réalité est en fait encore un peu plus complexe, car lorsque Pierre lance la balle, il lui communique aussi involontairement sa propre vitesse, qui est tangente à sa trajectoire; ce schéma n'en tient pas compte.

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 cavaliers dans le premier cas de figure – et qui n'existe donc pas ! – a été baptisée par les physiciens force de Coriolis. Cette force n'a donc pas de réalité, elle est dite fictive ¹². Ce curieux phénomène de déviation de Coriolis ¹³ constitue un puissant moyen pour savoir si on tourne ou pas... Imaginons que le manège soit enfermé sous une énorme cloche opaque qui empêche les cavaliers de voir le paysage autour d'eux. Dans un tel cas de figure, comment les enfants peuvent-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 déduisent 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 déduisent que le carrousel 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 avons bien visé, la balle atteint son objectif. Pourtant, la Terre tourne ! Donc 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) ! Alors, pourquoi dans notre quotidien, n'éprouvons-nous aucune difficulté à réceptionner la balle ?

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! Les effets de Coriolis sont donc dans le cas de la Terre, infimes. 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 (les personnes doivent être très éloignées l'une de l'autre).

LE PENDULE DE FOUCAULT

Léon Foucault a une idée géniale : pourquoi ne pas tenter d'observer la déviation liée à la rotation de la Terre sur le mouvement d'un pendule ? À chaque oscillation,

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 collé à la vitre!

¹³ 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 balancier du pendule est dévié de manière imperceptible, mais comme le pendule oscille un très grand nombre de fois, chaque petite déviation s'additionne aux précédentes¹⁴, 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, et 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.

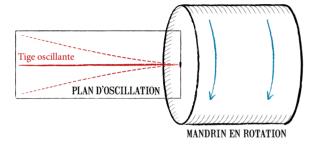


fig. 04

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.

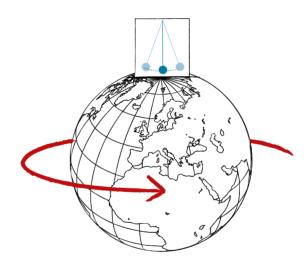


fig. 05

Aux pôles, et uniquement aux pôles, 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 24h, 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!

-~≥ 20 •

¹⁴ Mais il ne faudrait pas que le support de fixation du pendule, emporté lui aussi par la rotation de la planète, perturbe le mouvement de la sphère.



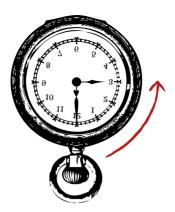


fig. 06

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 observateur situé au pôle Nord voit le plan d'oscillation du pendule de Foucault tourner dans le sens horlogique en 24h, un observateur installé au pôle Sud – donc « la tête en bas » – voit toujours le plan d'oscillation de son pendule tourner en 24h, mais cette fois dans le sens anti-horlogique.

À L'ÉQUATEUR... ET AILLEURS

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 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 est en une¹⁵. 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.

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 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!

Géométriquement

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 finalement ? 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.

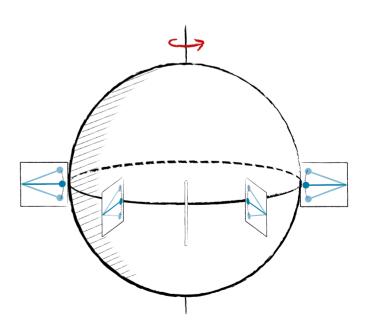


fig. 07

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.

Voir l'article «Le pendule de Foucault : un peu de théorie», écrit par Pierre Gillis, Francesco Lo Bue et Soizic Mélin.

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 !

Imaginer ce que voit finalement un observateur au sol 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 la latitude de Mons, et supposons que le pendule soit lancé dans la direction Nord-Sud (celle du méridien du lieu). Traçons sur cette mappemonde un trait qui représente la projection, sur le sol, du plan d'oscillation. La Terre tournant, nous nous déplaçons vers l'Est (le long d'un parallèle). Que se passera après un très bref instant?

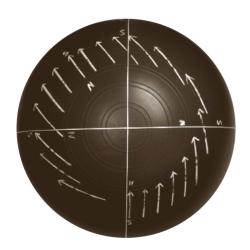


fig. 08

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 de la Terre, la trace n'a pas encore retrouvé son orientation initiale.

Pour le voir, il suffit de transporter parallèlement à elle-même la direction d'oscillation et de la projeter localement sur la mappemonde, là où se trouvera Mons. En procédant de la sorte, de proche en proche, nous pouvons nous rendre compte que la projection de l'oscillation tourne de plus en plus par rapport aux repères locaux au fur et à mesure que nous sommes embarqués par la rotation de la planète. Nous remarquons aussi, chose étonnante, que la trace n'a pas retrouvé son orientation de départ après un tour de mappemonde, il faudra encore se déplacer d'environ un quart de tour supplémentaire pour que la trace retrouve sa direction de départ. Nous trouvons une période de l'ordre d'une trentaine d'heure (24 h 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.

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 : on constate donc bien que le pendule ne dérive pas !

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, mettons-le en oscillation, et faisons tourner l'ensemble en utilisant par exemple un plateau tournant. Seule difficulté : il n'est bien entendu pas possible d'utiliser une ficelle pour réaliser un tel pendule. En effet, 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.

Le résultat est stupéfiant : à notre grand étonnement nous constatons que, alors que l'ensemble du dispositif a fait un tour complet, le plan d'oscillation du pendule,

lui, n'a pas retrouvé sa direction initiale. Il faut 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 ainsi retrouvé.

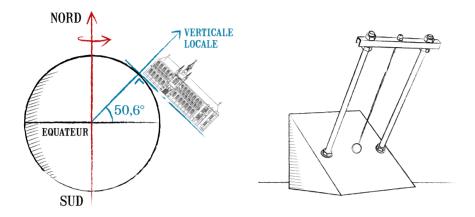


fig. 09

Le petit pendule métallique sur le plan incliné (schéma de droite) permet de simuler le mouvement du pendule de Foucault à la latitude de Mons (cf. schéma de gauche).

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 la rotation de la Terre contribue à la rotation à la latitude considérée. 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 rotation ¹⁶ globale de la Terre 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 ($\omega_{local} = \omega_{terre}$. $\sin \lambda$). 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 plus haut : le plan du pendule semble tourner en 24 h aux pôles (latitude 90°, $\sin 90^\circ = 1 \rightarrow \omega_{local} = \omega_{terre} \rightarrow T_{pôle} = 24 \, h$), ne pas tourner à l'équateur (latitude 0°, $\sin 90^\circ = 0 \rightarrow \omega_{équateur} = 0 \, rad/s \rightarrow T_{équateur} = \infty$), et tourner en un peu plus de 31 h à Mons (latitude 50,5°, $\sin 50,5^\circ = 0,77 \rightarrow \omega_{Mons} = \omega_{terre} \, 0,77 \rightarrow T_{Mons} = 24 \, h/0,77 = 31,2 \, h$).

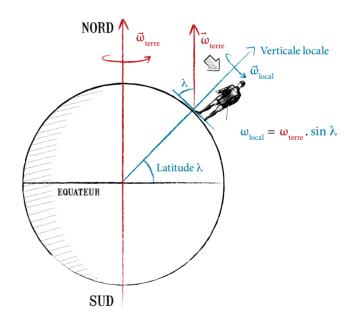


fig. 10

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.

¹⁶ Une rotation est caractérisée par un vecteur 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.

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 convaincus maintenant que le plan d'oscillation d'un pendule reste fixe au pôle, nous n'avons pas encore répondu à la question essentielle : par rapport à quoi ce plan conserve-t-il sa direction, si tout bouge dans l'Univers ? En effet, même assis dans notre salon, nous sommes embarqués par la Terre, qui tourne sur elle-même tout en gravitant autour du Soleil, lui-même en mouvement autour du centre de la Galaxie, elle-même se déplaçant au sein du Groupe local, qui n'est qu'une partie d'un ensemble mouvant de galaxies perdues au sein d'un super-amas de galaxies...

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 va progressivement dériver par rapport au sol en suivant parfaitement le Soleil dans sa course diurne d'Est en Ouest. Ensuite, le pendule semblera se désolidariser progressivement du Soleil : la direction Terre-Soleil n'est donc pas une direction fixe ou *inertielle* dans l'espace, et pour cause, nous tournons autour de l'astre du jour. 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 65 000 fois plus éloignée de nous que notre Soleil. Lancé initialement dans sa direction, le pendule semble la suivre précisément, mais ici aussi, après un certain temps, un décalage apparaît : la direction Terre-Betelgeuse ne doit finalement pas constituer un bon repère. Bételgeuse se déplace en effet dans notre Galaxie, et nous aussi, et à des vitesses différentes, la direction Terre-Bételgeuse n'est donc pas fixe dans l'Univers, ce pendule nous le montre!

En fait, pour trouver des cibles par rapport auxquelles le plan du pendule ne bougera pas, il faut les chercher aux confins de notre Univers observable. Seul, un pendule de Foucault au pôle, lancé en direction du centre de gravité d'un super-amas de galaxies lointaines, oscillera, comme verrouillé, dans cette direction. Les super-amas de galaxies permettent donc d'obtenir le fameux référentiel dans lequel le plan du pendule ne change pas d'orientation. Tout au plus, s'agit-il là du meilleur référentiel inertiel que la science mette actuellement à notre disposition !

Et nous en arrivons donc aux aspects les plus extraordinaires de son étude. 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, présente donc une connexion avec les objets cosmiques les plus lointains! De la mécanique, il nous emporte dans le domaine passionnant 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 prouvant 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 montrerait quelque chose de supposé fixe... en train de tourner avec une période de rotation apparente 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 rapidement sur elle-même ? Par contre, lorsque, suite aux frottements, la toupie finit par s'arrêter, elle tombe, inévitablement. Il en va de même pour un frisbee : un disque lancé simplement, sans avoir été mis en rotation, volera de manière instable, et n'ira pas bien loin. Le même disque, lancé en rotation rapide sur lui-même, pourra 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 perturbé¹⁷, 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 rigoureusement fixe. Les physiciens parlent de conservation du moment *angulaire* ou *cinétique*¹⁸. 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.

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'entend-t-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, va se mettre à tourner.

¹⁸ Mathématiquement, le moment angulaire est un (pseudo-)vecteur, aligné 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.

Foucault exploite donc cette propriété de conservation de la direction de l'axe de rotation¹⁹, 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* pas, contrairement à celui d'une simple toupie légèrement penchée par exemple.

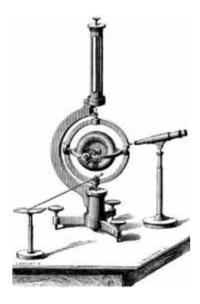


fig. 11

Réplique du gyroscope de Foucault. Un disque central pouvant tourner à grande vitesse est maintenu par une suspension à deux cardans, qui permet de l'orienter dans toutes les positions : le cardan intérieur permet de déplacer son axe dans le plan vertical, et le cardan extérieur dans le plan horizontal. Lorsque le disque est mis en rotation, son axe se fige par rapport à l'Univers lointain. Dès lors, si on le voit dériver, ce n'est qu'une apparence : en réalité, c'est nous qui, emportés par la rotation de la Terre, tournons, et pas la direction donnée par le gyroscope en fonctionnement. L'axe du gyroscope semble donc réaliser un tour complet en un peu moins de 24h, et ce quelle que soit la latitude où l'expérience est réalisée.

Comme l'objectif de Foucault est de s'en servir pour voir tourner la Terre, le physicien baptise son appareillage le *gyroscope*, s'inspirant du grec *voir tourner*.

Le principe de l'expérience est le suivant. Foucault choisit une orientation quelconque pour le rotor, qui est alors mis en rotation rapide. La direction de l'axe de rotation devient alors stable, parfaitement fixe, comme verrouillée par rapport aux systèmes galactiques les plus lointains.

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... Or, les lois de la physique disent que la direction de l'axe de rotation du rotor ne peut varier au cours du temps. 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 24 h.

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 !

¹⁹ 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 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 l'axe de son rotor 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-Sud²⁰.

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 gagné 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 nous en arrêter là. Pourtant aujourd'hui, l'étude de la rotation de la Terre est 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.

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 inaccessible²¹. 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 par exemple.

Ces étranges phénomènes liés aux rotations peuvent être mis en évidence par 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 vousmême, vous constaterez que la fourche se met à basculer 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 André Lausberg (astrophysicien, ULg).

²¹ Mis à part par l'étude des ondes sismiques.

LA TERRE: SPHÈRE OU DISQUE?

HOSSAM ELKHADEM (ULB)

On trouve encore aujourd'hui dans certains manuels d'histoire, ouvrages de vulgarisation scientifique ou encyclopédies, l'idée fausse selon laquelle il aurait fallu attendre la découverte du nouveau monde par Christophe Colomb (ca 1451-1506) – voire le retour des compagnons de Magellan (ca 1480-1521) de la première circumnavigation autour de la planète – pour que l'idée d'une Terre plate soit enfin abandonnée. Cette idée, défendue et répétée sans cesse, a dépassé le niveau populaire pour s'implanter dans l'enseignement régulier et officiel [réf.]. Or, il n'en est rien.

La conception de la Terre comme un corps sphérique date très probablement de l'époque de Pythagore (ca 560-ca 480 av. J.-C.). La conclusion des pythagoriciens est en parfaite harmonie avec des observations simples de phénomènes naturels. Il a toujours été évident que la surface de la mer n'est pas plane, mais bien courbe : quand un navire venant de la haute mer approche du port, on voit d'abord le sommet du mât, les voiles et la coque n'apparaissant que graduellement. D'autre part, lors d'une éclipse de Lune, l'ombre de la Terre sur la surface de la Lune est clairement sphérique. Le Soleil et la Lune sont sphériques et dès lors, la Terre, centre même de l'univers, se doit d'avoir une forme sphérique.

Les philosophes présocratiques ont à ce sujet des vues divergentes : par exemple, la Terre est plate et a la forme d'un disque flottant pour Anaxagore de Clazomènes (début ve siècle – ca 428 av. J.-C.) et pour Démocrite d'Abdère (ca 500 ou 457- ca 404 ou 359 av J.-C.) qui la voit comme un disque creux dans lequel l'eau s'accumule. Pour tous deux, comme pour Anaximène (vie siècle av. J.-C.), analysé par Aristote dans le De Caelo, la Terre est immobile et se situe au centre de l'univers. Pour Parménide (ca 505-après 450 av. J.-C.), au contraire, elle a la forme d'une masse parfaitement sphérique dont tous les points de la surface sont à égale distance du centre. C'est lui aussi qui ajouta au concept de la sphéricité de la Terre celui des cinq climats : la Terre est divisée en cinq zones parallèles, une zone équatoriale torride, deux zones polaires glaciales et entre ces deux extrêmes, deux zones de climat tempéré, siège de l'oicoumenè ou partie habitée de la Terre. Aristote reprit ce concept dans son Meteorologia et Eratosthène (ca 276-194 av. J.-C.) s'efforça de le préciser.



fig. 01

Carte du monde
et de ses cinq climats
imaginés par Parménide.

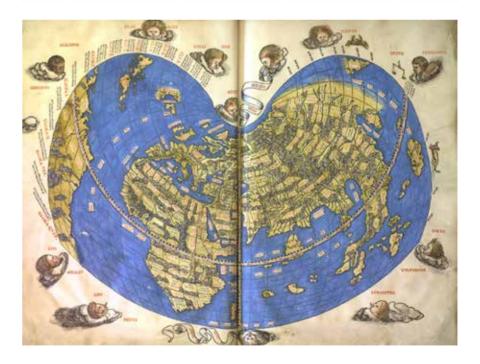


fig. 02Carte de Ptolémée.

~~ 34 v~~

Les pythagoriciens avaient donc énoncé la doctrine de la sphéricité des corps célestes et celle de leur mouvement circulaire uniforme, tous deux étant considérés comme parfaits. Cette double affirmation acquit la valeur d'un dogme définitif et non contestable quand elle s'imposa dans la physique aristotélicienne : dans cette cosmographie, la Terre est considérée comme immobile et occupant le centre ou l'axe de l'univers. Et ainsi, ce postulat pythagoricien, à travers l'astronomie, la physique, la philosophie et la cosmologie, devint un dogme durant l'Antiquité classique, le Moyen Âge et jusqu'au xvII^e siècle.

Dans cette cosmographie, les corps célestes sont divisés en deux catégories : les étoiles errantes et les étoiles fixes. Les étoiles errantes sont les planètes (le Soleil, la Lune, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne), elles ont chacune un mouvement circulaire uniforme qui leur est propre. Quant aux étoiles fixes, elles se comportent de façon parfaitement rationnelle en gardant strictement leurs positions respectives l'une par rapport à l'autre. Elles tournent autour de la *Terre-axe* avec une parfaite régularité mathématique.

Pour Platon, les mouvements des étoiles errantes (planètes) sont, en réalité, aussi réguliers que ceux des autres corps célestes, bien que plus compliqués. Ils sont le résultat de combinaisons de mouvements circulaires uniformes. Eudoxe de Cnide (Ive siècle av. J.-C.), disciple de Platon, apporta un support rationnel à la théorie de son maître. Il introduisit dans la cosmologie grecque un schéma de première importance : il conçoit le ciel comme une structure géométrique composée de sphères concentriques, toutes centrées sur la Terre, ayant chacune un mouvement propre, uniforme et indépendant du mouvement des autres sphères. Chaque planète est ainsi associée à plusieurs sphères concentriques qui tournent à des vitesses différentes autour d'axes différents. Eudoxe fait également une distinction entre le monde céleste intelligible et parfait et celui des changements incessants.

Aristote adopta cette charpente pour l'univers, mais la physique aristotélicienne porta la dualisation cosmologique encore plus loin. Elle se résume dans la différence entre deux mondes opposés, à savoir, le monde supra lunaire et le monde sublunaire. Le premier est le monde parfait, éternel, divin et composé de la quintessence : le mouvement y est circulaire et ne connaît pas d'accélération angulaire. Le second est le mode de la génération et de la corruption, du changement et du déclin, de la vie et de la mort. Ce monde est fait des quatre éléments – feu, eau, air et terre –; les mouvements y sont capricieux et irréguliers.

Aristarque de Samos (ca 310-230 av. J.-C.) proposa une autre cosmologie. Pour lui, le Soleil est immensément large et la comparaison avec la Terre rend difficile à accepter que le petit corps domine le grand. De plus, il est encore plus difficile de concevoir que des milliers d'étoiles tournent, avec une régularité

remarquable autour de la Terre tandis qu'elle-même reste immobile. Aristarque avança l'hypothèse que le Soleil se trouve au centre de l'univers et que la Terre exécute une rotation autour de son axe en un jour et autour du Soleil en un an. Seule la Lune tourne autour de la Terre et la rotation des étoiles autour de la Terre n'est qu'une illusion due à la rotation journalière de la Terre autour de son axe dans la direction opposée. Aristarque a donc posé la première hypothèse héliocentrique mais elle fut le plus souvent ignorée ou rejetée par le monde savant et ne réapparut pas avant la publication par Nicolas Copernic (1473-1543) du *De revolutionibus orbium caelestium* (1543). La théorie fut définitivement acceptée en 1609 quand Kepler remplaça les orbites circulaires par des orbites elliptiques.

Au II° siècle après J.-C., Claude Ptolémée (ca 100-ca 170), dans le premier livre de l'*Almageste*, fit appel aux mêmes preuves que Pythagore et Aristote pour affirmer la sphéricité de la Terre. D'un autre côté, dans sa *Geographia*, il dressa une carte du monde ²² en donnant les coordonnées en longitude et latitude, en degrés et en minutes de quelque 8000 lieux. Les longitudes sont comptées à l'est du premier méridien qui passe par les îles Fortunées (les Canaries) et plus particulièrement par l'île de Fer, la plus méridionale de l'archipel. Le dernier méridien de l'oicumenè est celui de 180° qui passe par Cattigara en Chine. La latitude va de 63° de latitude nord à 16° de latitude sud. Le centre se trouvant à Syène (Aswan) où, le jour du solstice d'été, le Soleil éclaire le fond d'un puits.

Malgré les multiples tentatives de réforme du système ptoléméen par les astronomes arabo-musulmans entre le XIº et le XIVº siècle, les éléments constitutifs de cette cosmologie initiée par les pythagoriciens et codifiée par Aristote, sont restés pratiquement inchangés jusqu'à l'apparition en 1609 de l'*Astronomia Nova* de Kepler (1571-1630) qui y formula ses deux premières lois après avoir trouvé que l'orbite de Mars est elliptique et non circulaire. Ainsi la première loi sur les mouvements orbitaux des planètes constate que cette orbite est elliptique avec le Soleil comme foyer. La seconde dit que les aires balayées par le rayon vecteur allant du centre du Soleil au centre de la planète sont proportionnelles au temps employé à les décrire.

La position des pythagoriciens concernant la sphéricité de la Terre, telle que codifiée par Aristote, fut intégrée à la science arabo-musulmane dès la deuxième moitié du VIII^e siècle. Cependant des questions sur la sphéricité de la Terre et sa rotation continuèrent à se poser aux hommes de science. Par exemple, al-Biruni (ca 973-4048) se demande si la Terre tourne autour de son axe ou non mais ne donne pas de réponse à cette question. Même interrogation à l'Observatoire de Maragha au XIII^e siècle : al-Katibi dans son *Hikmat al-ain* discute l'hypothèse de la rotation diurne de la Terre. Certains

²² Leo BAGROW, "The Origin of Ptolemy's 'Geographia", Geografiska Annaler, XXVII, 1945, pp.318-387.

ayant émis l'objection qu'un oiseau volant dans le sens de la rotation ne sera jamais capable d'aller aussi vite, al-Katibi la réfute en faisant remarquer que l'atmosphère peut tourner avec la Terre, entraînant ainsi l'oiseau avec elle. Cependant, il rejette la théorie de la rotation quotidienne de la Terre car pour lui, tout mouvement terrestre naturel se fait en ligne droite et donc, il ne peut accepter que la Terre tourne sur elle-même.

D'un autre côté, Qutb al-Din al-Shirazi (1236-1311) dans le *Nihayat*, un important traité d'astronomie, discute également le mouvement de la Terre. Il conclut, suivant l'*Almageste*, que la Terre est une sphère immobile, placée au centre de l'univers. Elle ne possède aucun mouvement propre. Cette conclusion est partagée par Abu al-Faraj (1226-1286), un savant syrien qui travaillait à l'Observatoire de Maragha : la Terre est immobile et ne se meut ni en ligne droite, ni en cercle. Son traité d'astronomie, le *Sullaqa haunanaya*, écrit en syriaque, est un abrégé de l'*Almageste*.

Le fait que des mathématiciens et astronomes de la classe d'al-Biruni, d'al-Katibi ou d'al-Qutb al-Din al-Shirazi²³ aient pris la peine de s'exprimer, sans raison apparente, sur la rotation de la Terre autour de son axe ou autour du Soleil semble indiquer que d'autres savants croyaient en l'hypothèse héliocentrique ou au moins s'y intéressaient. Qu'ils n'aient pas exprimé ouvertement leurs idées montre le poids exercé par les préjugés aristotéliciens et ptoléméens.

Si le Moyen Âge islamique prit d'emblée le relais des théories aristotéliciennes quant à la sphéricité de la Terre, il n'en fut pas de même dans l'Occident chrétien qui subit une rupture d'avec les traditions antiques. Au Moyen Âge, âge de croyance et de foi, l'image de la Terre est le reflet de concepts religieux et la notion de sphéricité de la Terre ne s'accorde pas avec deux notions indispensables : la position de Jérusalem comme centre de la chrétienté et la localisation du Paradis terrestre dans le monde. Ces deux points ne sont concevables que sur une Terre plate. En effet, si la Terre était sphérique, Jérusalem devrait se trouver au centre de la sphère, donc à l'intérieur du globe et serait, de ce fait, invisible et inaccessible. Quant au Paradis terrestre, il se trouverait à la surface du globe, donc à la périphérie de l'oikoumenè, chose impensable. Le concept de Terre plate fut donc mis au service de la foi.²⁴

La cartographie médiévale, de son côté, se heurta aux impératifs de la géographie biblique : la carte en T-O, probablement le type le plus connu de mappemonde de l'époque médiévale, divisait la Terre en trois continents – l'Europe, l'Asie et l'Afrique – peuplés chacun par les descendants des trois fils de Noé et entourés par l'océan. À cause d'une perspective défectueuse et de l'absence d'une géométrie

projective fiable, la mappemonde en T-O peut donner l'impression que le Moyen Âge en général était favorable au concept d'une Terre plate. Or on peut certes interpréter une carte T-O 25 comme une roue ou un disque mais on peut aussi y voir la représentation d'une portion de sphère – le monde connu – sur une carte plate, exactement comme une carte d'Europe ou d'Afrique ne représente qu'une partie du globe terrestre. On peut rappeler ici que Bede (673-735) précisait que la Terre est « ronde » non comme « un cercle », mais comme « une boule » 26 . Cependant, l'interprétation de cette classe de mappemondes comme indicatrice de la conception d'une Terre plate surgit encore de temps à autre, surtout lorsqu'il s'agit de discuter les doctrines géographiques répandues au xve siècle.



fig. 03

Jean Mansel, La fleur des histoires, carte T-O attribuée à Simon Marion, ca 1460, Bruxelles, Bibliothèque royale de Belgique, Cabinet des Manuscrits, ms. 9231, fol. 281v.

On peut affirmer qu'à partir de la deuxième moitié du xı^e siècle, l'image du monde et celle de l'univers sont conformes à la physique aristotélicienne et au système astronomique ptoléméen, et cela pour la grande majorité de l'intelligentsia.

Aux environs de 1220, l'astronome et géographe Johannes Sacrobosco (1190-1250) publia l'un des plus célèbres traités du Moyen Âge latin. Basé sur les travaux de Ptolémée et des astronomes et mathématiciens arabes, notamment al-Farghani (mort après 861) et al-Battani (né avant 858), le *De Sphaera* fut enseigné, à partir du XIII^e siècle, dans toutes les écoles d'Europe. C'est par l'intermédiaire de ce traité

²³ George SARTON, Introduction to the History of Science, vol.II, Part 1, New York, 1975.

²⁴ W.G.L. RANDLES, De la terre plate au globe terrestre, une mutation épistémologique rapide 1480-1520, Paris, 1980, p.17.

 $^{^{\}rm 25}~$ Ainsi dénommée car elle a l'aspect caractéristique d'un T inscrit dans un O.

²⁶ Jeffrey Burton RUSSELL, Inventing the Flat Earth, Columbus and Modern Historians, New York, Westport, Connecticut, London, 1991, pp. 17-18, 20.

que la théorie des cinq zones de Parménide se propagea dans la géographie et la cartographie occidentales. Selon cette théorie, la zone torride et les deux zones glaciales sont inhospitalières, inhabitables et infranchissables. Toutefois, Roger Bacon (ca 1219-ca 1292) dans son *Opus Majus* et Albert le Grand (ca 1200-1280) dans son *De Natura Locorum* mirent en doute ces caractéristiques négatives.

Au xiv^e siècle, des cosmographes ont pensé que, contrairement à la doctrine généralement acceptée, l'éventualité de la rotation de la Terre méritait d'être explorée. L'hypothèse qu'Aristarque de Samos avait formulée au iv^e siècle av. J.-C. n'avait jamais été complètement oubliée. Les recherches les plus approfondies en ce domaine furent l'œuvre de Jean Buridan (ca 1295-ca 1358) et de Nicole Oresme (ca 1320-1382). Leurs théories, formulées indépendamment, reposent essentiellement sur le même argument : l'hypothèse du mouvement de la Terre élimine immanquablement la nécessité d'attribuer une rotation journalière à chacune des huit sphères célestes. En d'autres termes, on substitue à un nombre important de mouvements à vitesse élevée un seul mouvement à vitesse réduite, celui de la Terre. Il en résulte une économie de mouvements très appréciable. L'idée d'une Terre tournant autour de son axe était à l'époque tellement insoutenable que Jean Buridan et Nicole Oresme, s'ils avaient été les premiers à la suggérer, furent aussi les premiers à le rejeter.²⁷

Vers 1410, Pierre d'Ailly (1350-1420) publia son *Ymago Mundi*, un des livres de chevet de Christophe Colomb. Un aspect très important de ce traité est qu'il forme la jonction entre le Moyen Âge et la Renaissance. Cinq ans après la publication de l'ouvrage de Pierre d'Ailly, parut la première traduction latine de la Geographia de Ptolémée dont le texte original avait été récupéré à Byzance au XIII^e siècle. La Geographia donna aux cosmologues, géographes et cartographes les outils scientifiques et mathématiques nécessaires pour visualiser l'image du monde sur des cartes en deux dimensions ainsi que sur des globes terrestres. Parmi ces outils, les plus précieux sont d'une part, la projection cartographique, une technique qui permet d'ouvrir la sphère terrestre et de l'étaler sur une surface en deux dimensions et, d'autre part, le système des coordonnées, déjà utilisé dans les tables astronomiques et ensuite introduit dans la cartographie terrestre. La traduction latine de la Geographia par Jacobus Angelus de Scarparia, publiée à Venise en 1475, ancra définitivement Ptolémée dans la culture de la géographie scientifique européenne. La carte du monde de Ptolémée représente un stade intermédiaire entre la mappemonde médiévale et le globe terrestre dont le plus ancien que nous connaissions est celui de Martin Behaïm (1459-1507) construit en 1492.



fig. 04

Le plus ancien globe terrestre
connu à ce jour, réalisé
par Martin Behaïm en 1492.

Il est clair que, de même qu'au v^e siècle av. J.-C., plus un seul philosophe ou astronome grec ne mettait en doute la sphéricité de la Terre, de même au xv^e siècle faisait-elle définitivement partie de l'éducation en Europe. Rappelons que l'histoire des sciences et de la philosophie arobo-musulmanes montre qu'aucun savant ou philosophe n'a jamais émis le moindre doute quant à la sphéricité de la Terre. On peut dès lors légitimement se demander d'où vient la légende d'un conflit continu entre les tenants de deux opinions contradictoires.

On affirme même que Christophe Colomb a dû se battre contre l'idée de la platitude de la Terre défendue par les ignorants, les hommes d'église, les autorités académiques. Ainsi, l'écrivain américain Washington Irving (1783-1859), dans sa biographie de Christophe Colomb, *The Life and Voyages of Christopher Columbus* (1828) ²⁹, décrit une scène purement imaginaire qui ne s'appuie sur aucune réalité historique. La scène se déroule à l'université de Salamanque, l'un des plus grands sièges intellectuels d'Espagne. On y décrit une confrontation, organisée sur ordre du roi Ferdinand et de la reine Isabelle, entre Christophe Colomb et une assemblée d'intellectuels de l'époque : astronomes, géographes, cosmographes, théologiens et autres mathématiciens, parmi lesquels Fernando de Talavera, un dominicain prieur du monastère du Prado et confesseur de la reine Isabelle. L'inquisition vient d'être créée et les procès des suspects d'hérésie ont commencé.

→∾ 41 🛩

²⁷ Hossam ELKHADEM, «Image du monde, de l'Antiquité au Moyen Âge», Voyages et voyageurs à Byzance et en Occident du VF au XF siècle, éd. Alain Dierkens et Jean-Marie Sansterre, Genève, 2000, pp.15-16.

²⁸ Edward GRANT, Physical Science in the Middle Ages, New York, 1971.

Washington IRVING, The Works of Washington Irving, vol.VI., London, 1866, pp.44-50; Samuel Eliot MORISON, The Oxford History of the American People, New York, Oxford, 1965, pp. 17-18.

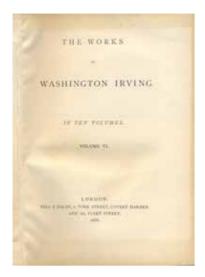


fig. 05

Ouvrage à l'origine de l'idée encore répandue aujourd'hui, selon laquelle, à l'époque de Christophe Colomb, la Terre était toujours considérée comme plate.

Devant cet aréopage d'érudits et de dignitaires ecclésiastiques, Colomb apparaît comme un simple et obscur marin, comme un aventurier un peu visionnaire. Colomb s'attendait à des questions et à des critiques relevant de la géographie ou de l'astronomie, mais, à son grand étonnement, on l'attaque sur des questions relatives à la Bible, aux Psaumes, aux Prophètes et aux Evangiles. Une des questions soulevées dans ce débat est celle de l'existence dans l'hémisphère sud, aux antipodes donc, d'êtres humains « avec leurs talons en l'air », existence déjà affirmée par Pline l'Ancien (23-79) mais que les théologiens de Salamanque récusent, s'appuyant sur les écrits de Lactance (ca 260-ca 325) et de Saint Augustin (354-430). Saint Augustin affirmait en effet que l'idée des antipodes était contraire à la foi, car, s'il existait des terres habitées du côté de la Terre opposé au nôtre, il faudrait admettre l'existence de nations qui ne seraient pas descendantes d'Adam, ancêtre commun à tous selon la Bible. Or, comment ces êtres, étant donc nécessairement descendants d'Adam, auraient-ils pu traverser l'Océan qui sépare les continents ? Autre objection avancée par les docteurs de la foi : dans les Psaumes, le ciel est comparé à une peau d'animal qui est étendue comme une tente. Saint Paul, lui aussi – qui était au départ un fabriquant de tentes – dit que le ciel est comme une tente. Colomb certainement aurait été déstabilisé et déconcerté par ces questions, comme tout bon chrétien craignant d'être accusé d'hérésie.

Les adversaires de Colomb lui objectent aussi que jamais il ne pourra traverser la zone torride, que, même s'il réussissait à la traverser, il mourrait de faim et de soif avant la fin de son voyage, car la circonférence de la Terre est si grande qu'il faudrait au moins trois ans pour la parcourir, que, même en admettant la sphéricité de la Terre selon l'autorité d'Epicure (341-270 av. J.-C.), seul l'hémisphère nord est habitable, le reste n'étant que chaos et anarchie et que, même s'il arrivait à la fin du monde, il ne pourrait

jamais revenir car la sphère terrestre, c'est comme une montagne sur laquelle il n'est pas possible de naviguer... Samuel Eliot Morison³⁰ décrivit ce débat fictif imaginé par Irving comme « pure moonshine ». De fait, la sphéricité de la Terre était enseignée dans toutes les universités du Moyen Âge et Colomb ne dut jamais argumenter à ce sujet. Ce n'est qu'un des nombreux mythes attachés à sa personne. En revanche, ce qui posait problème, c'était les dimensions de la Terre. On peut dire, en schématisant un peu, que la découverte de l'Amérique est la conséquence de cette transmission du savoir que nous avons évoquée plus haut : de Ptolémée qui avait estimé la Terre à cinq septièmes de sa grandeur réelle, en passant par les Arabes qui ont dû réévaluer la longueur du stade³¹ grec pour arriver aux traducteurs latins qui n'ont pas réalisé que le mille arabe n'était pas le même que le leur, la Terre est restée plus petite qu'elle n'est.³² En effet, sans cette erreur, jamais Colomb n'aurait pensé pouvoir rejoindre la Chine depuis les côtes atlantiques de l'Europe, avec des bateaux de petit format qui ne pouvaient emporter que peu de réserves en eau et en nourriture... Et jamais il n'aurait pu convaincre Ferdinand et Isabelle de la faisabilité de son projet. Comme le dit Carlo Alfonso Nallino³³ « Benedetto l'errore che e tornato a cosi grande vantaggio dell'umanità.»

[Réf.]

Comme le montre cette anecdote racontée par Rudolf Simek au début de son bel article sur la forme de la terre: "My first visit to Hereford in the 1980s took place at the height of the campaign to keep the mappamundi in the cathedral. We joined a very interesting guided tour round the cathedral, in the course of which we finally saw the map, but I was shocked to learn from the guide's description that the picture shown presented a typically medieval depiction of the flat earth, surrounded by the ocean. Despite my surprise at this outdated understanding of a medieval mappamundi, one has to admit that this view is still often enough found in historical handbooks, to say nothing of school text-books. I had, until then, been collecting references to medieval sources proving that the earth is spherical, but after the experience with the guide in Hereford I began to look systematically for references to a flat earth. The belief that medieval man considered the earth to be flat is so generally accepted and is so often retold at school, from one generation to another, that it seemed worthwhile trying to trace its sources. To cut a long story short, in the material I am most familiar with – Latin, Middle High German, and Old Scandinavian texts – it is impossible to find references to the kind of flat, round earth that is associated with today popular understanding of the medieval flat earth view. It seems all the more worthwhile to investigate where the myth of the medieval flat earth originated, and why it has become so prevalent over the last two centuries."

Texte extrait de SIMEK, Rudolph, *The Shape of the Earth in the Middle Ages and Medieval Mappaemundi* dans *The Hereford World Map. Medieval World Maps and the Context*, ed. P. D. A. Harvey, London, The British Library, 2006, p.293

→ 42 ×

³⁰ Op.cit., p.53.

³¹ Stade : unité de longueur utilisée par les Grecs anciens.

³² Carlo Alfonso NALLINO, Ilm al-falak tarikhiyhi ind al-arab fi al-quruwn al-wusta, Roma, 1911, pp.292-293; la traduction italienne se trouve dans Raccolta Di Scritti Editi e Inediti, Astologia – Astronomia – Geografia, vol.V a cura di Maria Nallino, Roma, 1944, pp.305-306.

³³ Ibid., p.306.

LORSQUE GALILÉE INVENTAIT LA PHYSIQUE

PIERRE GILLIS (UMONS)

Galilée est l'un des personnages les plus célèbres de l'histoire des Sciences. Si le physicien italien a profondément marqué l'évolution des idées sur le mouvement, il restera surtout dans la mémoire collective comme le farouche défenseur du modèle héliocentrique. Son procès et sa fameuse phrase Eppur si muove sont devenus légendaires.

Foucault, dit-on généralement, a prouvé que la Terre tourne. Il n'était pas le premier à le prétendre – l'absence de preuve formelle n'avait en effet pas freiné Copernic et Galilée, pas plus qu'elle n'avait empêché quelques audacieux précurseurs comme le philosophe grec Aristarque de Samos (310-230 av. J.-C.) d'avancer l'idée, sans y croire dur comme fer pour autant.



fig. 01

Copernic (1473-1543).



Galilée (1564-1642).

L'idée d'une Terre ballottée dans l'espace va évidemment à l'encontre des représentations dominantes depuis l'Antiquité. Celles-ci associent en effet aux mouvements diurne et annuel des étoiles, que toutes les civilisations ont observés, l'image d'une voûte céleste plus ou moins rigide, transparente et parfois même cristalline; cette représentation

est la conséquence de l'invariance des positions relatives de presque toutes les étoiles, invariance qui a permis d'inscrire les positions des étoiles dans des constellations. Pourquoi pas vraiment toutes? Parce que quelques «astres errants» – c'est l'étymologie du mot planète - échappent à cette stabilité d'ensemble, et, bien qu'ils participent au mouvement diurne de la voûte céleste, ils décrivent au fil des années des mouvements compliqués. À l'œil nu, on peut, outre la Lune et le Soleil, observer Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Ces planètes, êtres mystérieux, ont particulièrement attiré l'attention des astronomes, qui ont petit à petit mis au point une représentation fiable de leurs mouvements. Cette représentation, géocentrique, revient à supposer que chaque planète parcourt un cercle dont le centre est lui-même en mouvement circulaire autour de la Terre – c'est ce qu'on appelle un épicycle. C'est le grec Hipparque qui a le premier imaginé ce mouvement, au II^e siècle avant Jésus-Christ; divers ajouts le compliquèrent de manière à rendre compte le plus fidèlement possible des observations astronomiques, Claude Ptolémée, au II^e siècle après Jésus-Christ, en donnant l'exposé le plus complet, appelé l'Almageste. Le niveau de précision des prédictions (concernant les positions des planètes) basées sur la théorie de Ptolémée était remarquable.

Aristarque de Samos nous est connu par les citations qu'Archimède en a faites. Il avait fait remarquer qu'on pouvait très simplement expliquer les apparences si l'on adoptait une représentation héliocentrique, la Terre tournant sur elle-même en un jour et autour du Soleil en un an, la Lune tournant autour de la Terre, et toutes les autres planètes autour du Soleil. Mais cette représentation avait été jugée indéfendable d'un point de vue «réaliste», sur base d'arguments liés à la physique aristotélicienne dominante à l'époque : comment aurions-nous pu ne pas sentir que le sol sur lequel nous vivons n'est pas immobile ? Comment les objets situés à la surface de la Terre auraient-ils pu éviter d'être envoyés dans l'espace sous l'effet du mouvement de rotation de la Terre ?

LE MODÈLE DE COPERNIC N'EST PAS UN TRUC MATHÉMATIQUE

Ces questions – de nature physique, insistons-y – sont encore au centre de la polémique à propos de Galilée, près de 2 000 ans plus tard. Copernic redécouvrira les idées d'Aristarque, et il publiera en 1543 son *De Revolutionibus* où elles sont exposées. Le statut de sa proposition fut l'enjeu, dès le début, d'une intense lutte philosophique : s'agissait-il d'un modèle destiné à «sauver les apparences», comme on disait à l'époque, c'est-à-dire d'un modèle permettant plus simplement que précédemment de prédire les mouvements des astres dans le ciel, ou bien d'une tentative de nouvelle description du monde ? Dans l'édition originale de l'œuvre, Osiander, théologien luthérien, rédige une préface qui prend clairement parti en faveur de la première possibilité : «il n'est pas nécessaire que ces hypothèses soient vraies ni même vraisemblables. Une seule chose suffit : qu'elles offrent des calculs conformes à l'observation. » Il est aujourd'hui clair que Copernic ne croyait pas aux objections aristotéliciennes, et que la préface d'Osiander est

rien moins qu'une trahison, sans doute attribuable à une prudence compréhensible face aux puissants de l'époque. On peut s'en rendre compte à la lecture de la lettre-préface que Copernic avait adressée à Paul III, en parfaite contradiction avec la thèse d'Osiander :

« C'est ainsi que, étant posés les mouvements que plus bas dans mon œuvre j'attribue à la Terre, je trouvai enfin par de longues et nombreuses observations que, si les mouvements des autres astres errants étaient rapportés au mouvement [orbital] de la Terre et que celui-ci était pris pour base de la révolution de chacun des astres, non seulement en découlaient les mouvements apparents de ceux-ci, mais encore l'ordre et les dimensions de tous les astres et orbes, et qu'il se trouvait au ciel lui-même une connexion telle que dans aucune de ses parties on ne pouvait changer quoi que ce soit sans qu'il s'ensuive une confusion de toutes les autres et de l'Univers tout entier. » Un demi-siècle plus tard, dans une lettre adressée à Monsignore Piero Dini, le 23 mars 1615, Galilée enfonce le clou :

« Ceux qui persistent à affirmer que Copernic, comme astronome, a considéré seulement comme une hypothèse la mobilité de la Terre dans la mesure où elle permet de mieux sauver les apparences célestes et s'accorde mieux avec les calculs sur les mouvements des planètes, mais sans la juger vraie dans la réalité, montrent (et cela soit dit sans malveillance) qu'ils se sont trop fiés à ceux qui parlent davantage pour leur propre compte, qu'à partir d'une connaissance assidue de l'ouvrage de Copernic et des problèmes mis en cause; en suite de quoi leurs discours manquent forcément de justesse.

Et d'abord (pour se limiter aux indices généraux), que l'on examine la préface qu'il adressa au pape Paul III, à qui l'œuvre est dédiée; on y trouvera en premier lieu comment, pour satisfaire au rôle que l'on dit être celui de l'astronome, Copernic avait conçu et réalisé son travail en accord avec l'hypothèse philosophique ordinaire et conformément à Ptolémée – et cela de telle sorte que rien ne laissait à désirer. Mais dépouillant l'habit du pur astronome pour revêtir celui de contemplateur de la nature, il se mit ensuite à rechercher si cette supposition autrefois introduite par les astronomes, et qui concordait de façon satisfaisante avec les mouvements apparents des planètes prises une à une, pouvait aussi subsister réellement dans la nature des choses; s'apercevant alors qu'un tel agencement des parties du ciel ne pouvait avoir d'existence – car si chacune considérée pour elle-même était fort bien proportionnée, leur réunion aboutissait à former la plus monstrueuse des chimères - il commença, je l'ai dit, à se demander ce que pouvait réellement le système du monde : et il ne s'agissait plus, cette fois, d'aider l'astronome, dont les calculs d'ailleurs étaient accomplis, mais bien d'élucider un des grands problèmes de la philosophie naturelle, étant certain en outre que si l'on avait pu satisfaire aux simples apparences avec des hypothèses non vraies, on y parviendrait encore mieux à partir de la constitution authentique de l'Univers. Riche d'un grand nombre d'observations exactes sur les mouvements des étoiles, Copernic entreprit donc infatigablement la recherche de cette constitution; guidé par l'autorité d'auteurs anciens si nombreux et si illustres, il se mit alors à considérer la mobilité de la Terre et

l'immobilité du Soleil (et sans cet exemple et cette autorité, ou bien cette opinion ne lui serait jamais venue à l'esprit, ou bien elle lui aurait semblé, comme ce fut le cas, dit-il, au premier abord, un immense paradoxe); enfin, au terme de longues observations, convaincu par des concordances de toute sorte et par les plus solides démonstrations, ce système lui parut si accordé à l'harmonie du monde, qu'il fut pleinement assuré de sa vérité. S'il l'introduisit, ce ne fut donc pas pour satisfaire aux besoins du pur astronome, mais bien pour obéir à la nécessité de la nature.»



fig. 03 Le système héliocentrique de Copernic.

GALILÉE, PHYSICIEN RÉALISTE

Galilée était un héliocentriste résolu, au moins depuis la fin du xvī siècle, mais il était aussi conscient de la force des arguments inspirés par la science aristotélicienne, déniant toute vraisemblance au système héliocentrique. Il s'échinera dès lors à les

~~ 46 ×~

réfuter, développant pour ce faire une science nouvelle, celle des mouvements des objets, de la chute des corps, etc.

Il ne faut donc pas s'y tromper, Galilée est un physicien plus qu'un astronome – même s'il a passé beaucoup de temps derrière sa lunette. On retiendra qu'il a exploité systématiquement ses découvertes astronomiques pour casser le modèle géocentrique de l'univers ptolémaïque. Ainsi, la découverte des satellites de Jupiter lui a permis d'anéantir la notion de voûte céleste (pensée comme un gigantesque dais tendu au-dessus de la Terre) : si les satellites en question disparaissent régulièrement de notre vue, c'est qu'ils passent derrière Jupiter, sans être arrêtés par une éventuelle sphère céleste. Et en passant, on désigne un centre de rotation de plus – après le Soleil pour les planètes et la Terre pour la Lune, Jupiter en serait donc un troisième. Les phases de Vénus sont aussi importantes de ce point de vue : Galilée les interprète comme un indice d'importante variation de distance, invraisemblable si Vénus tournait autour de la Terre. Et l'observation des taches solaires, dont il se dispute la paternité de la découverte avec les Jésuites de l'observatoire de Rome, porte un coup sérieux au caractère incorruptible, parfait et immuable du monde supra-lunaire, une des idées-clés de la physique aristotélicienne.

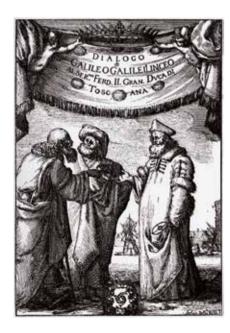


fig. 04 Salviati, Simplicio et Sagredo dans le frontispice du Dialogue de Galilée.



fig. 05

Le cardinal Robert Bellarmin.

L'Église catholique était prête à couvrir le développement de calculs basés sur un modèle héliocentrique, à condition que le modèle en question abandonne toute ambition de donner une image réaliste du monde. Bertolt Brecht a finement traduit cette exigence dans sa pièce *La vie de Galilée* ³⁴ en mettant les propos suivants dans la bouche du cardinal Bellarmin, à cette époque à la tête du Saint-Office (l'Inquisition) : « Si des cartes célestes, prenant pour base une hypothèse nouvelle, rendent la navigation plus facile pour nos marins, ma foi qu'ils les utilisent. Ce que nous n'aimons pas, ce sont seulement des doctrines qui donnent un démenti à l'Écriture. »

Le procès dont Galilée a été l'accusé portait précisément là-dessus. Dix-sept ans avant le procès, Bellarmin, questionné par Galilée (prudent!) qui voulait savoir où il mettait les pieds en développant ses recherches en astronomie, lui avait conseillé de ne se référer à la cosmologie de Copernic qu'en tant qu'hypothèse de travail. Lui en fit-il l'injonction formelle ? L'Inquisition produisit au procès de Galilée un procès-verbal de réunion qui l'affirmait, mais ce document est contesté et taxé de faux, notamment parce qu'il ne porte pas la signature de Galilée – il aurait été rédigé après coup, en prévision d'un éventuel procès. Galilée, semble-t-il, croyait, seize ans plus tard, que les temps étaient mûrs pour réactiver le débat en toute impunité, et a fait fi des conseils de prudence en publiant son Dialogue sur les deux grands systèmes du monde, en 1632. Ce Dialogue, dont on peut s'étonner que la première publication en français ne soit vieille que de vingt ans 35, est resté, contrairement à bien des textes fondateurs en science, remarquablement lisible, cherchant à convaincre le lecteur, polémique par moments... Il a été écrit en italien, alors que la langue des lettrés de l'époque était le latin, ce qui atteste aussi la volonté de Galilée de se forcer l'écoute d'un public plus large. Quinze ans plus tôt, il justifiait déjà le choix de l'italien pour une œuvre antérieure : « Je l'ai écrite en langue vulgaire parce que je veux que tout le monde puisse la lire, et cette même raison m'a poussé à écrire dans la même langue mon dernier traité... Je veux qu'ils constatent que la nature, de même qu'elle leur a donné des yeux pour voir ses œuvres,... leur a donné un cerveau pour les discerner et les comprendre. » 36

Le *Dialogue* met en scène un trio débattant, entraîné par Salviati, copernicien résolu, qui s'oppose à l'aristotélicien Simplicio, leur controverse étant arbitrée par Sagredo, sceptique de bon aloi, dont la résistance est surtout destinée à permettre à Salviati de préciser sa pensée, de sorte que celle-ci l'emporte tout au long du livre.

Il est évident que Galilée n'a jamais cru que le modèle héliocentrique dont il s'est fait le héraut n'était qu'un truc mathématique destiné à sauver les apparences. Le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, publié en 1632, et qui déclencha la procédure judiciaire, est précisément écrit pour réfuter les arguments physiques censés invalider

³⁴ Bertolt Brecht, *Théâtre complet*, tome III (Éditions de L'Arche, Paris, 1959).

³⁵ Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (Éditions du Seuil, Paris, 1992).

³⁶ Lettre de Galilée à Paolo Gualdo, 1612.

le système de Copernic, bien plus que pour en démontrer la véracité astronomique. Galilée n'est pas le fondateur d'un nouveau système astronomique; mais il est le génial initiateur d'une nouvelle vision du monde et des lois de la nature. Exiger de Galilée qu'il accepte l'idée que le système de Copernic ne décrit que les apparences, c'est donc nier le sens même de toute son entreprise. Pourtant, c'est à cette position – celle de Bellarmin – que Jean-Paul II a donné un second souffle, en conclusion de la longue procédure de réexamen de l'affaire Galilée par l'Église catholique (1982 - 1992). On a en effet pu lire sous sa plume que Bellarmin avait raison de suggérer à Galilée de présenter le système de Copernic comme une hypothèse, « tant qu'il n'était pas confirmé par des preuves irréfutables, précise Jean-Paul II. C'était pourtant là une exigence de la méthode expérimentale dont il [Galilée] fut le génial initiateur » ³⁷.

LES PREUVES EN PHYSIQUE

Preuve? N'en demandons pas trop... Peut-on dire aujourd'hui que la théorie de la relativité générale est prouvée? Elle est admise par tous les physiciens, parce qu'elle explique de nombreuses observations, parce que sa formulation mathématique est cohérente et rigoureuse, et qu'elle n'a pas été mise en défaut. Mais il me semble abusif de dire qu'elle est prouvée, ce qui ne l'empêche nullement de prendre sa place (qui est grande) dans les conceptions modernes du monde et de la nature. Et pour revenir au modèle héliocentrique, il aura fallu attendre Foucault pour qu'on parle de preuve – mais tous ceux qui ont jeté un regard attentif aux développements mathématiques qui expliquent la durée de la rotation du plan d'oscillation du pendule de Foucault savent à quel point ces développements sont inscrits dans la mécanique mise au point par Newton, Lagrange, Hamilton et quelques autres. Rejetez la mécanique, il ne reste rien de la preuve.

Il est sans doute plus juste de dire que Galilée nous approvisionne en arguments en faveur de l'héliocentrisme, en discutant systématiquement les objections qui lui étaient faites. Ainsi, ses adversaires prétendaient que si la Terre tournait, la chute d'un objet, lâché du sommet d'une tour, ne devrait pas être verticale, puisque pendant le temps mis par l'objet pour atteindre le sol – 3 secondes pour une chute de 45 m, estimation raisonnable pour une tour – le bas de la tour aurait dû se déplacer suite à la rotation de la Terre sur elle-même, et pas d'un peu : à peu près de 600 mètres ! Le point de chute de l'objet devrait donc être situé à 600 mètres du pied de la tour... Et comme il n'en est rien, c'est que la Terre ne tourne pas. Cqfd. Galilée comprend au contraire que le sommet de la tour étant déjà en mouvement au moment du lâcher, le corps qui tombe accompagne la Terre dans son mouvement, étant affecté d'une vitesse initiale dont la composante horizontale est précisément due à la rotation de la Terre.

GALILÉE TOUT PRÈS DU PRINCIPE D'INERTIE

Les prémisses de l'énoncé du principe d'inertie sont présentes dans l'argumentation de Galilée. On peut d'ailleurs trouver, toujours dans le *Dialogue*, une autre formulation, plus explicite, à ce sujet. « *Un degré de vitesse quelconque*, une fois communiqué à un mobile, s'imprime en lui de façon indélébile du seul fait de sa nature, et pourvu que soient supprimés les causes extérieures d'accélération et de ralentissement, ce qui n'a lieu que sur un plan horizontal; sur un plan descendant, en effet, il existe déjà une cause d'accélération, et sur un plan ascendant, une cause de ralentissement; d'où il suit que le mouvement sur un plan horizontal est éternel; car s'il est uniforme, il ne s'affaiblit ni ne diminue, et encore moins ne cesse. »

Einstein avait coutume de dire que Galilée avait « presque » exprimé le principe d'inertie, c'est d'ailleurs pourquoi il a baptisé « principe d'inertie de Galilée » l'énoncé qu'en toute rigueur on devrait attribuer à Newton. Presque... Que manquait-il au juste à Galilée ? Aurait-il simplement négligé de systématiser une idée présente dans son œuvre – erreur de méthode, en quelque sorte, donnant là quelque peu raison à Descartes lorsqu'il reproche à Galilée une certaine forme de confusion ³⁸, ou y a-t-il là quelque chose de plus profond ?

J'incline à penser qu'un véritable obstacle épistémologique s'opposait à la découverte du principe d'inertie par Galilée, et cet obstacle tient à son approche du mouvement circulaire. Plus précisément, Galilée semble attribuer un caractère purement inertiel au mouvement circulaire uniforme. Remarquons d'abord que la citation présentée ci-dessus n'est pas incompatible avec l'idée d'un mouvement circulaire purement inertiel : Galilée parle en effet de mouvement uniforme sur un plan horizontal – mais à l'échelle de la planète, un plan horizontal n'est pas autre chose qu'une sphère concentrique à la Terre. Et pour éviter d'attribuer un caractère inertiel à ce mouvement circulaire, il aurait fallu prendre en compte l'existence de la force de gravitation, force à distance, dont l'idée même faisait horreur à Galilée – comme à Newton, d'ailleurs, mais ce dernier est toutefois passé outre à ses réticences.

_____ 51 v~___

³⁷ Discours du Souverain Pontife Jean-Paul II aux membres de l'Académie pontificale des Sciences réunis à Rome en Assemblée plénière: Copernic, Galilée et l'Église, L'Osservatore Romano, n°45, 10 novembre 1992 (pp. 6 - 7).

³⁸ Lettre de Descartes à Mersenne du 11 octobre 1638 : « Mais il me semble qu'il manque beaucoup ence qu'il fait continuellement des digressions et ne s'areste point à expliquer tout à fait une matière; ce qui montre qu'il ne les a point examinées par ordre, [...], sans avoir considéré [...] les premières causes [...]; et ainsi qu'il a basti sans fondement »; il, c'est Galilée. Ce désordre n'est pas pour rien dans le charme du texte de Galilée, le plaisir que procure sa lecture étant sans commune mesure avec celui qu'apporte Le discours de la méthode. Cette constatation est en elle-même une réponse à la prudence formelle de Bellarmin : grise est la théorie, et vert l'arbre de la vie, disait Goethe. C'est bien de la vie et du monde que nous entretient Galilée, et il entend nous convaincre que sa conception du monde est la bonne, qu'elle est en accord avec la réalité de ce monde. C'est dans ce but qu'il multiplie les images, les métaphores, qu'il nous entraîne dans des expériences de pensée, qu'il affirme effectuées des expériences qui ne l'ont peut-être jamais été, dans une démarche qui, pour être sincère sur le fond, n'est pas toujours exempte d'une once de mauvaise foi.

LES MARÉES : UNE BOURDE HISTORIQUE

La même explication vaut pour l'erreur commise par Galilée à propos des marées. Parmi les arguments développés par Galilée en faveur de la rotation de la Terre, il en est en effet un qui, bien que faux, on s'en est rendu compte plus tard, a fait forte impression. C'est celui qui concerne l'explication des marées par le double mouvement de rotation de la Terre, sur elle-même et autour du Soleil, sans faire appel à l'influence de la Lune. Galilée lui-même le considérait comme décisif, au point qu'il avait d'abord souhaité intituler son essai *Du flux et du reflux*. La commission pontificale de «révision» renvoie à ce sujet à la contribution de Georges Béné³⁹, par ailleurs subtil initiateur des expériences de résonance magnétique nucléaire en champ terrestre, et le pape s'appuie sur les propos du physicien genevois. Béné écrit, sans s'embarrasser de fioritures, que «le Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde prétend prouver le mouvement de la Terre par les marées. Cet argument était connu comme faux par les scientifiques de l'époque pour qui l'action lunaire était la vraie cause des marées. Dans cette affaire, le retrait du livre - émanant d'une autorité responsable de la science profane aussi bien que de la doctrine catholique – s'inscrit dans le même contexte que le refus d'un travail reconnu inexact par le comité de lecture d'un journal scientifique sérieux d'aujourd'hui».

Clairement faux, à l'époque, l'argument par les marées ? Non, il faisait l'objet de discussions enflammées. Il faudra attendre la théorie de la gravitation de Newton pour que la question soit éclairée d'un jour nouveau, et pour que, par la suite, une explication du phénomène des marées – comme un effet de la gravitation lunaire (et un peu solaire) sur l'eau des océans – s'impose comme satisfaisante.

Egidio Festa montre clairement dans son remarquable ouvrage ⁴⁰ qu'Urbain VIII exigea le changement du titre, non pas parce qu'il croyait l'argument faux, mais bien au contraire, **parce qu'il le trouvait convaincant**. Le problème réel était donc inverse de celui que désigne Jean-Paul II : ce n'est pas le manque de preuve irréfutable que l'Inquisition a reproché à Galilée, mais bien la mise en avant de ce qui apparaissait à l'époque comme une telle preuve – et dénoncer le caractère erroné de cette preuve est un anachronisme flagrant.

Pour les théologiens de l'époque, y compris Bellarmin 41 (cf. page précédente), aucune découverte scientifique ne devait contredire le contenu des Écritures. Egidio Festa rappelle d'ailleurs qu'Urbain VIII s'était replié sur une position inexpugnable : Dieu, dans sa toute-puissance, peut faire en sorte que les phénomènes observés indiquent que la Terre est en mouvement, alors qu'elle est immobile et que le Soleil tourne, comme l'affirment les Écritures. C'est d'ailleurs l'argument que Galilée place dans la bouche de Simplicio, en guise de conclusion au *Dialogue*; Urbain VIII s'est ainsi découvert sous Simplicio, ce qui ne lui fit aucun plaisir et contribua à aggraver les problèmes de Galilée. Il n'existe évidemment aucune réponse scientifique à un tel argument, après lequel il ne reste qu'à tirer l'échelle...

Pour en revenir à la théorie galiléenne des marées, elle est évidemment fantaisiste, d'abord parce que la périodicité qu'elle prédit est de 12 heures entre deux marées hautes (en acceptant l'idée qu'une marée haute apparaît pour chaque accélération et pour chaque décélération), alors qu'elle est en réalité de 12 heures 25 minutes, comme le savent notamment les enfants qui jouent sur la plage à la côte belge. On peut accorder des circonstances atténuantes à Galilée : il est vraisemblable qu'il ne connaissait que les marées de la Méditerranée, particulièrement peu spectaculaires, et dès lors particulièrement dépendantes de la configuration géographique locale.

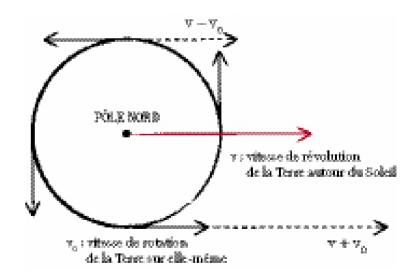


fig. 06

D'après Galilée, les marées seraient dues à la modification de la vitesse locale de déplacement sur Terre (par rapport au Soleil), selon que la vitesse de rotation $v_{\scriptscriptstyle 0}$ s'ajoute ou se retranche à $v_{\scriptscriptstyle 0}$ la vitesse de révolution sur l'orbite planétaire.

──≈ 53 ∞

³⁹ Galileo Galilei, 350 ans d'histoire, 1633-1983, sous la direction de Mgr Paul Poupard, avec une déclaration de Jean-Paul II (Desclée International, Tournai, 1983).

⁴⁰ Egidio Festa, L'erreur de Galilée (Éditions Austral, Paris, 1995).

Egidio Festa cite une phrase de Bellarmin que Jean-Paul II passe sous silence, et qui est décisive à cet égard : «Celui qui écrivit: le Soleil se lève et se couche revenant à son lieu propre fut Salomon, qui non seulement parla sous l'inspiration de Dieu, mais qui fut aussi un homme exceptionnellement sage et savant [...]; toute cette science, il l'avait reçue de Dieu et il n'est pas vraisemblable qu'il ait pu affirmer une chose contraire à la vérité démontrée, ou que l'on pourrait démontrer». A méditer en relisant cette citation de Galilée : «Les phénomènes naturels sont directement voulus par Dieu. Des observations ou des conclusions directes ne devraient donc pas être mises en doute si elles semblent être en contradiction avec les Écritures saintes, car le texte des Écritures n'est pas régi par des lois aussi strictes que les effets naturels.» (1615, lettre à la grande duchesse Christine).

Avec le recul, la grossièreté de l'erreur est une indication précieuse du poids des obstacles qui empêchaient Galilée de s'approcher de l'explication correcte – les mêmes que ceux qui l'avaient amené à surestimer l'inertie des mouvements, au point de ne pas faire de différence claire entre un mouvement rectiligne et un mouvement circulaire. On peut en effet lire dans le *Dialogue*: « Kepler me surprend plus que les autres [grands hommes qui ont philosophé sur les marées], et je m'étonne que lui, esprit libre et perspicace, qui avait en main les mouvements attribués à la Terre (par Copernic) ait ensuite prêté l'oreille et donné son assentiment aux suprématies de la Lune sur l'eau et à des propriétés occultes, ainsi qu'à d'autres enfantillages ». Galilée s'interdisait d'envisager un quelconque effet lunaire!

GALILÉE ET KEPLER

Plus généralement, les rapports de Galilée avec Kepler font problème. Comment expliquer que Galilée, premier physicien des temps modernes, soit passé à côté d'une découverte majeure de son temps, celle de la forme elliptique (plutôt que circulaire) des trajectoires des planètes, dont Kepler avait pourtant tenu à lui faire part ?

Les historiens des sciences sont nombreux à s'être penchés sur cette énigme. Leurs travaux montrent que la réponse est à chercher dans un faisceau d'explications, plutôt que dans une cause unique. L'une d'entre elles se dissimule probablement derrière l'acceptation d'un abandon partiel du contenu empirique des théories, comme l'avance Feyerabend 42, Galilée n'étant pas plus intéressé par les ellipses de Kepler qu'il ne l'avait été par les épicycles que Copernic avait dû ajouter à ses circonférences pour mieux ajuster ses prédictions aux observations astronomiques.

Tous les historiens ne se satisfont cependant pas de cette première explication. Dans un langage moderne, on dira que Galilée a vraiment introduit les concepts de la cinématique, ceux qui permettent de décrire les mouvements. Par contre, il était assez rétif à ce qu'on appellera plus tard la dynamique, fondée par Newton, dans la mesure où l'idée même de force à distance lui paraissait inacceptable, enrobée qu'elle était dans un jargon mystico-magique qu'il a précisément largement contribué à abandonner. Il n'est donc pas tellement surprenant que Galilée ait refusé d'abandonner l'idée que les planètes sont animées d'un mouvement circulaire, dans son esprit le seul dont la poursuite n'exigeait pas l'intervention de force extérieure dont il imaginait par ailleurs difficilement la nature.

De ce point de vue, Kepler avait moins de préjugés; comme l'écrit l'historien Vigano à propos de l'étude systématique qui permit à Kepler d'établir ses trois fameuses lois, « il est cependant typique de son temps que Kepler mêlât à ce travail

scientifique sérieux, fondé sur des mesures précises et des calculs mathématiques rigoureux, des considérations étranges sur les rapports entre les distances des planètes par rapport au Soleil et les dimensions d'imaginaires polyèdres réguliers, inscrits les uns dans les autres, ou encore, des rapports harmoniques musicaux, où joue l'influence du symbolisme prôné par les écoles pythagoricienne et néo-platonicienne ».



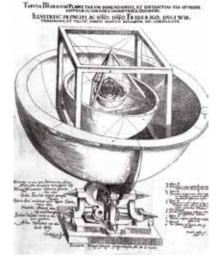


fig. 07

Johannes Kepler.

fig. 08

Le modèle des polyèdres réguliers de Kepler.

Globalement, l'avancée conceptuelle de Galilée est sans commune mesure avec celle de Kepler (en faveur de Galilée, s'entend !) – un regard rétrospectif sur l'histoire des sciences le montre clairement. Mais cela n'empêche que les avancées décisives de Galilée en cinématique ont pratiquement rempli le rôle d'obstacle épistémologique pour son acceptation du caractère elliptique des orbites planétaires, pour des raisons d'ordre philosophique (Galilée était résolument réfractaire à un certain occultisme de Kepler, ce qui plaide aujourd'hui en sa faveur) et scientifique (le refus d'abandonner

son principe d'inertie circulaire), au sens d'une exigence de cohérence rationnelle.

Finalement, on retiendra de Galilée qu'il fut le premier des physiciens réalistes, au sens où il était convaincu que les avancées théoriques des philosophes (comme on disait de son temps) ou des physiciens (comme on dirait aujourd'hui) dessinent le seul chemin qui nous conduit vers la compréhension de la réalité du monde. Pour vous en convaincre, on terminera par une dernière citation, toujours extraite du *Dialogue*, véritable profession de foi matérialiste :

<u>~~~</u> 55 ∞~~

⁴² Paul Feyerabend, Contre la méthode, Seuil, Paris, 1979.

«... Pour prouver que la chose se passe d'une certaine façon, [notre auteur, i.e. Aristote] soutient que c'est de cette façon qu'elle s'accorde à notre intelligence, ou qu'autrement nous n'aurions pas accès à la connaissance de tel ou tel détail, ou que serait ruiné le critère de la philosophie. C'est comme s'il disait que la nature a d'abord fait le cerveau des hommes et ensuite disposé les choses conformément à la capacité de leurs intellects. Je penserais plutôt, moi, que la nature a d'abord fait les choses à sa façon et elle a ensuite fabriqué les raisonnements humains capables de saisir, à grand-peine certes, quelque chose de ses secrets.»

LES CONTRIBUTIONS DE LÉON FOUCAULT À LA SCIENCE ET AUX TECHNIQUES

FRANCIS MICHEL (UMONS)



fig. 01

Léon Foucault (1819-1868).

Peu connu du grand public, Léon Foucault, né en 1819, a marqué son époque par son ingéniosité et sa minutie. Son nom est associé à des mesures fondamentales comme celle de la vitesse de la lumière, à des expériences spectaculaires comme celle du pendule du Panthéon, à l'étude des courants induits dans les conducteurs en mouvement dans un champ magnétique et au développement des techniques modernes de taille et de contrôle optique des miroirs de télescope. Physicien mais aussi ingénieur, il s'est penché sur des problèmes d'intérêt pratique difficiles, comme la régulation des lampes à arc ou la réalisation d'un pendule conique pour l'entraînement des mouvements d'horlogerie.

Très renfermé, exigeant pour les autres comme pour lui-même, tout à la fois réservé et ambitieux, patient et emporté, Foucault a mené une vie très simple (il ne s'est jamais marié et a passé une bonne partie de sa vie auprès de sa vieille mère), mais il a aussi côtoyé les grands de ce monde. Un bel ouvrage ⁴³ très documenté paru en

~~ 56 ×~~

⁴³ William Tobin, Léon Foucault, Ed. EDP Sciences, collection Sciences et Histoires, 2002, 352 pages (traduit de l'anglais par James Lequeux).

2002, dont je recommande chaudement la lecture, rend aujourd'hui justice à ce personnage hors du commun, certes un peu austère mais pourtant très attachant; c'est ce livre qui nous servira de fil rouge dans le présent article.

LES DÉBUTS DANS LA VIE

Jean Bernard Léon Foucault est né dans une famille aisée. Son grand-père était colon à Saint Domingue – partie orientale de l'actuelle île d'Haïti –, soumise à l'esclavage et grande productrice de sucre de canne; des émeutes ayant éclaté sur l'île, sa famille regagna la France et élut domicile à Nantes. Son père, Jean Léon Fortuné, gagna Paris et y tint longtemps un commerce de livres; il s'est illustré par la publication d'une impressionnante série de *Mémoires relatifs à l'Histoire de France* comptant 130 volumes. Il se retira de la librairie en 1830. Atteint d'une maladie mentale, il fut privé de tutelle en 1834 et c'est son épouse, assistée d'un subrogé tuteur, qui présidera dès lors aux destinées de la famille. Léon Foucault avait alors 14 ans et semble avoir été très marqué par ce coup du sort; il se montrera psychologiquement fragile toute sa vie durant. Son père décédera finalement en 1839.

Dès l'adolescence, Léon Foucault se révèle rigoureux et précis. Il réalise la maquette d'un télégraphe Chappe – ce télégraphe optique qui précéda le télégraphe électrique et qui faisait usage de bras articulés auxquels on pouvait donner de nombreuses positions différentes; un réseau de postes couvrait alors la France et permettait si le temps était clément d'envoyer par exemple un message de Paris à Toulon en 2 heures – une performance incroyable pour l'époque. Il construisit aussi la réplique d'une machine à vapeur.

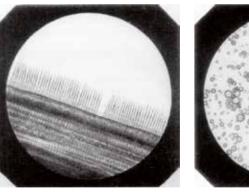
Il entama des études secondaires au collège Stanislas mais s'y montra peu studieux; finalement son éducation fut assurée par un précepteur privé, et il deviendra bachelier ès lettres en 1837. En vue d'une inscription en Faculté de médecine – il se destinera d'abord à la chirurgie où sa précision manuelle aurait pu faire merveille –, il présentera un second « bac », cette fois ès sciences physiques. Petit et chétif, de santé délicate, il sera exempté du service militaire. Ses amis de l'époque le décrivent comme peu accommodant, n'aimant pas les concessions mais restant calme et imperturbable quand il défendait ses idées. Cette intransigeance ne lui vaudra pas que des amis...

LES PREMIÈRES RECHERCHES

Un des premiers centres d'intérêt scientifique de Foucault sera la photographie. Nicéphore Niépce vient d'en établir le principe; il s'agit encore d'une technique bien imparfaite : les temps de pose sont monstrueux (plusieurs heures en plein soleil) et le résultat peu convaincant. C'est Daguerre qui rendra la technique plus accessible : il parviendra à

réduire le temps de pose et résoudra le délicat problème de la fixation de l'image, la rendant insensible à des expositions ultérieures à la lumière. Enfin Hippolyte Fizeau, dont nous aurons l'occasion de reparler, introduira un procédé de bromuration qui permettra finalement d'obtenir des temps de pose de quelques secondes, et donc de réaliser des photographies de personnages vivants. Foucault s'appliquera à perfectionner le procédé.

Cependant, une des contributions importantes de Foucault à la photographie sera d'appliquer cette technique naissante à la recherche scientifique, et notamment à la microscopie. Bien entendu, la faible sensibilité des plaques rendait la microphotographie avec les sources lumineuses de l'époque tout à fait impraticable; cependant, en faisant usage d'un héliostat – appareil envoyant un faisceau de lumière solaire dans une direction fixe malgré le mouvement du Soleil –, Foucault réalisa en 1845, en collaboration avec le médecin Alfred Donné, de belles microphotographies qui seront réunies dans un atlas, à une époque où l'application de la microscopie à la médecine n'allait pas de soi. Notons que des essais, partiellement concluants, furent aussi tentés à l'aide de la lumière de Drummond, obtenue en portant un morceau de craie à l'incandescence à l'aide d'un chalumeau oxhydrique, puis avec la lumière provenant d'un arc électrique; mais le Soleil restera, pour de nombreuses années encore, la seule source de lumière utilisable en microphotographie. Notons que le daguerréotype sera remplacé par les négatifs sur verre dès 1850.



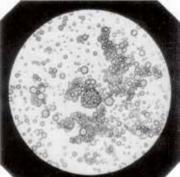


fig. 02

Microphotographies de l'atlas de Donné et Foucault : cils de la moule (gauche) et lait d'ânesse (droite).

L'année 1845 constitue un tournant dans la vie de Foucault : il abandonne définitivement la médecine. Il se tourne vers l'étude de la nature de la lumière – sujet auquel il reviendra par la suite. Depuis les expériences décisives d'Young, et surtout d'Augustin Fresnel, on sait que la lumière a des propriétés ondulatoires,

se matérialisant par des effets d'interférence et de diffraction : la théorie corpusculaire de Newton semble définitivement abandonnée. Cependant ce caractère ondulatoire n'a pas encore été vérifié dans toutes les régions du spectre. On sait par exemple qu'au-delà de la région rouge, où l'œil ne détecte plus rien, il existe des rayons dits «infrarouges» que l'on peut mettre en évidence à l'aide d'un thermomètre sensible ; de même il existe au-delà de la région violette des rayons qui impressionnent encore la plaque photographique. Ces rayons sont-ils de même nature que les rayons lumineux ordinaires ? Foucault parvient à créer, en combinant des rayons de la partie infrarouge du spectre, des franges d'interférence, qu'il met en évidence à l'aide de thermomètres très fins qu'il promène dans la figure d'interférence : les rayons infrarouges sont donc aussi de nature ondulatoire! Citons aussi les expériences, menées en collaboration avec Fizeau, concernant les figures d'interférence correspondant à de grandes différences de marche.

LE VULGARISATEUR

Pendant des années – de 1845 à 1862 –, Foucault sera le chroniqueur scientifique d'un journal important de l'époque, le *Journal des Débats*; il y relate les séances de l'Académie des Sciences. Destinés à un public éclairé, parfois difficiles à lire, ses articles sont en général très vivants et pleins d'enthousiasme. Fidèle à sa réputation, Foucault n'évite ni attaques, ni polémiques, ce qui lui vaudra maintes inimitiés, notamment lors de son élection à l'Académie. Voici comment par exemple il commente le compte-rendu d'un naturaliste, Henri Dutrochet, concernant les réactions d'une algue, le *chara*, au champ magnétique d'un électroaimant :

«L'expérience est décrite avec beaucoup de soin: les dimensions du fer doux, le nombre des coupes employées pour y développer l'aimantation, la distance à laquelle il faut placer le chara, rien n'y manque; et avec ces données chacun pourra comme lui constater qu'il ne se passe rien de particulier. On a beau changer les pôles, augmenter ou diminuer l'intensité du courant, le chara ne s'en émeut en aucune façon et se soucie fort peu qu'il y ait auprès de lui un aimant à porter le tombeau de Mahomet ou qu'il n'y en ait pas. Assurément, il faut être membre de l'Institut pour trouver moyen de faire un Mémoire pour si peu.»

Il n'apprécie pas les excès de certains vulgarisateurs dont l'exposé fait trop de place à l'anecdote, ce qui ne l'empêche pas de se montrer parfois très lyrique; il dit à propos de la rosée :

«La rosée apparaît aux esprits réfléchis comme l'un des phénomènes les plus propres à exciter d'une manière douce et persuasive le sentiment des harmonies de la nature. Avec quelle abondance elle se précipite sur les plantes lorsqu'une nuit calme et transparente succède à un beau jour d'été!»

Les séances de l'Académie faisaient parfois place à des communications de mathématiques. Foucault, esprit peu abstrait, ne s'y sentait pas à l'aise, et peu de ses articles font écho à ces comptes rendus. Voici ce qu'il dit du grand Cauchy:

«Depuis longtemps on avait désespéré de rien plus comprendre aux effrayantes élucubrations analytiques de M. Cauchy. M. Jamin s'est dévoué à saisir, quand il y en un, le sens physique de cette transcendante analyse. Grâce au concours de cet intelligent interprète, il est possible que M. Cauchy finisse par nous révéler de loin en loin quelques menus brins de vérité concrète...»

Enfin, il s'attache à pourfendre superstitions et préjugés, mais il pressent que ce combat n'est pas prêt de s'éteindre :

« Il serait difficile de dire aujourd'hui sous quelle forme l'incroyable s'offrira à la crédulité du vulgaire dans les siècles à venir; mais il est certain que les savans et les esprits positifs de l'époque auront, comme aujourd'hui, bien d'erreurs à combattre et de luttes à soutenir contre les préjugés. »

Il ne croyait pas si bien dire...

QUELQUES DÉVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES...

Examinons quelques-uns des multiples travaux de Foucault consacrés à la technique et à la science appliquée.

Vers 1847, Foucault s'intéresse à l'entraînement d'une nouvelle lunette astronomique qui doit être installée à l'Observatoire de Paris. L'entraînement traditionnel par une horloge à balancier n'est pas sans inconvénients : le mouvement est saccadé, la régulation étant assurée par un balancier qui actionne un échappement à ancre. Pour atténuer les effets de cet ennuyeux «tic-tac», on peut tenter d'amortir le mouvement transmis à la lunette. Foucault envisage une solution plus radicale : pourquoi ne pas faire usage d'un pendule conique, dont le balancier, au lieu d'effectuer un mouvement d'aller et retour, décrit une trajectoire circulaire sans à-coups ? Bien que Foucault ne soit pas le premier à avoir pensé à cette solution élégante, il semble, dit Foucault, que « ... cette idée n'a jamais été, que je sache, l'objet d'aucune application sérieuse et durable ».

La réalisation pratique du pendule conique se révélera plus compliquée que prévu. En particulier, l'isochronisme des oscillations, qui étaient de grande amplitude (environ 20°), posera un problème ardu, la trajectoire initialement circulaire du balancier tendant après quelque temps à devenir elliptique. Foucault sortira ulcéré de l'aventure : non seulement de nombreux projets de pendules coniques voient

subitement le jour, et Foucault crie au plagiat («...depuis le jour où nous avons fait notre présentation, des machines analogues ont surgi de tous côtés, et parmi elles on en trouve qui présentent avec la nôtre une ressemblance incontestable »), mais surtout son projet ne sera pas retenu par l'Observatoire.

Un autre problème auquel Foucault s'attaquera est celui de la distribution électrique de l'heure à l'intérieur de l'Observatoire. Le principe n'était pas nouveau : une horlogemère, parfaitement réglée, envoie des signaux électriques à des horloges-esclaves qui sont ainsi de fait synchronisées avec elle. Les signaux électriques sont par exemple générés pas le contact du balancier de l'horloge-mère avec un ressort très souple.

Un problème qui se révéla plus ardu fut celui, abordé par de nombreux techniciens, de la régulation de l'arc électrique. Découvert en 1801 par Humphry Davy, et à l'époque source de lumière la plus intense après le Soleil, l'arc électrique jaillit entre deux charbons, reliés aux pôles d'une pile puissante, que l'on met brièvement en contact puis qu'on écarte de quelques millimètres : la décharge vaporise le carbone et le rend incandescent. À cause de cette vaporisation, les électrodes s'usent – surtout celle reliée au pôle positif – et, si aucune action n'est prise, l'arc s'éteint bientôt de lui-même. L'utilisation pratique de l'éclairage par l'arc électrique nécessite donc la présence d'un mécanisme gardant constante la distance entre les charbons. Plus tard, le problème sera résolu de façon plus élégante en utilisant deux électrodes de charbon parallèles séparées par une couche de produit isolant fusible à haute température : les célèbres bougies Jablochkoff, qui devaient être alimentées en courant alternatif pour éviter une usure dissymétrique des charbons.

Ici encore, Foucault ne sera pas récompensé de ses efforts. Il mit au point en 1848, avec l'aide du constructeur d'instruments Gustave Froment, un système fonctionnant de façon satisfaisante, mais les remous de la révolution de 1848 l'empêchèrent de publier son résultat immédiatement. Il apprit avec désespoir qu'un ingénieur anglais, Edward Staite, avait réalisé en même temps que lui un appareil régulateur, dont les détails avaient été publiés au mois de novembre et qui avait servi à une démonstration publique à Trafalgar Square. Il réussit bien à convaincre l'Académie que ses travaux étaient originaux et indépendants de ceux de Staite, mais il découvrit que ce dernier avait introduit un brevet couvrant l'Angleterre et la France. Il ne reviendra au problème de l'arc électrique qu'en 1855.

... ET PLUS FONDAMENTAUX

Ses recherches sur l'arc électrique lui permirent de mettre le doigt sur un effet qui joue maintenant un rôle essentiel en astrophysique stellaire : le «renversement» des raies spectrales. En fait, il avait remarqué dans le spectre de la lampe à arc deux raies jaunes brillantes très voisines, qu'il pensait pouvoir assimiler à deux raies sombres observées dans le spectre solaire, connues sous le nom de *raies D*; en fait on sait aujourd'hui que ces raies,

qui apparaissent dans beaucoup de spectres, sont dues au sodium, élément omniprésent dans notre environnement (c'est l'un des éléments constituant le sel de cuisine : la couleur jaune qui apparaît souvent dans la flamme des becs des cuisinières au gaz est due au sodium). Pour confirmer cette conjecture, il fit passer un faisceau de lumière solaire au travers de l'arc électrique. Les raies D du spectre solaire apparurent en effet exactement à la même place que les raies observées dans le spectre de l'arc, mais plus sombres qu'en observation directe. Il confirma cette observation surprenante en focalisant la lumière blanche émise par l'une des électrodes, dont le spectre est continu, et en la faisant traverser l'arc : à nouveau les raies apparurent sombres, alors qu'on aurait pu s'attendre à ce que la lumière de l'électrode, additionnée à celle de l'arc, donne à la longueur d'onde des raies D un maximum d'intensité! Ce renversement des raies D, dont Foucault ne comprit pas immédiatement l'explication, fut redécouvert en 1859 par Gustav Kirchhoff, mais cette fois avec une flamme. Ce dernier donna une explication correcte du phénomène : les composantes de la lumière blanche qui traversent la flamme ont exactement la fréquence qu'il faut pour exciter les atomes de sodium qui s'y trouvent, mais ces atomes réémettent ensuite ce rayonnement dans toutes les directions, et non pas nécessairement dans la direction du faisceau initial; il y a donc déficit de lumière à ces longueurs d'onde.

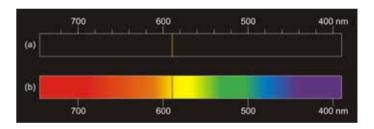


fig. 03
Les raies D (jaunes) du sodium : (a) en émission ; (b) en absorption dans un spectre continu.

Foucault comprit néanmoins immédiatement l'intérêt de ses observations pour l'astronomie : « ... ce phénomène nous semble dès aujourd'hui une invitation pressante à l'étude des spectres des étoiles, car, si par bonheur on y retrouvait cette même raie, l'astronomie stellaire en tirerait certainement parti ». D'autre part il comprit aussi que les raies D devaient être liées à la présence d'un élément particulier. La pleine utilisation de cette découverte dut attendre 1860, avec la publication d'un article fondamental dû à Bunsen et Kirchhoff, dans lequel les raies observées dans le spectre du Soleil sont systématiquement comparées aux raies des différents éléments produites en laboratoire. Dans un article de vulgarisation, Foucault s'enthousiasme :

« Toutes ces vapeurs vibrent comme des harpes avec une sonorité propre, émettant dans l'espace des notes lumineuses douées d'un timbre inaltérable, et capables de franchir les plus grandes distances. Qu'importent donc les 30 millions de lieues qui nous séparent du Soleil ?»

LA MESURE DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE : PREMIER ROUND...

Foucault traverse alors une phase dépressive, suite à ce qu'il considère comme des semi-échecs: non seulement son pendule conique et son système de régulation de l'arc électrique n'ont pas eu le succès escompté, mais sa candidature à la Société philomatique – considérée comme l'antichambre de l'Académie – se heurte plusieurs fois à un revers (il n'y sera élu que le 15 décembre 1849, par 93 voix sur 96). Dans un courrier adressé à Urbain Le Verrier, directeur de l'Observatoire de Paris, Alfred Donné, qui est resté son ami, note à son propos: « À la suite de travaux assidus ou simplement d'un séjour trop prolongé à Paris, je l'ai vu tomber dans un anéantissement dont j'ai été effrayé ».

Vers 1850, Foucault se penche sur un problème fondamental: la vitesse de la lumière est-elle plus grande ou plus petite dans l'eau que dans l'air? La question peut à première vue sembler anecdotique, mais elle sous-tend un très ancien débat, déjà évoqué plus haut à propos des propriétés des rayons infrarouges. Dans le cadre de l'hypothèse corpusculaire, la réfraction d'un rayon lumineux qui passe de l'air dans l'eau ne peut se comprendre que si les corpuscules qui le composent subissent de la part de l'eau une force attractive: en effet, on observe que le faisceau se rapproche de la normale. La vitesse des corpuscules dans l'eau doit donc être supérieure à celle observée dans l'air. C'est exactement l'inverse dans le cadre de l'hypothèse ondulatoire: pour qu'il y ait rapprochement de la normale, il faut que les plans d'onde se déplacent moins vite dans l'eau que dans l'air.

L'idée d'une vérification expérimentale était dans l'air; en particulier, François Arago avait suggéré de partager l'image d'une étincelle électrique verticale en deux parties, l'une se propageant dans l'air et l'autre dans l'eau; la clé de l'expérience était de faire tomber ces deux images sur un miroir tournant à grande vitesse : les deux demiimages observées après réflexion devaient être légèrement décalées l'une par rapport à l'autre si les vitesses de propagation dans les deux milieux sont différentes, puisque l'impulsion lumineuse la plus lente tomberait sur le miroir avec un peu de retard par rapport à sa voisine, retard pendant lequel le miroir aurait un peu tourné. Arago avait estimé qu'après la traversée d'un tube d'eau long de 14 mètres, une vitesse de rotation du miroir de quelque 1 000 tours par seconde devait suffire pour trancher. Tout ceci suppose que la durée de l'étincelle est très brève – bien plus brève que la différence de temps entre l'arrivée des deux signaux. Arago tenta de réaliser concrètement l'expérience en se faisant aider de Louis Bréguet, un autre célèbre constructeur d'instruments scientifiques. Pour rendre le phénomène visible, ils réussirent à faire tourner le miroir à la vitesse sidérante de 8 000 tours par seconde! Mais l'accumulation de nombreuses difficultés expérimentales les empêcha de conclure et ils abandonnèrent l'expérience.

C'est alors que Foucault et Fizeau s'attaquent à leur tour au problème. Fizeau décide de laisser provisoirement de côté la comparaison des vitesses air/eau, et de mesurer la vitesse absolue de la lumière dans l'air.

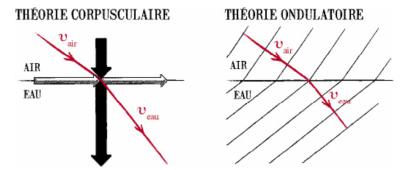


fig. 04

Si Newton a raison, la lumière doit se propager plus vite dans l'eau que dans l'air ; c'est l'inverse dans la théorie de Huygens...

Ce n'était pas une «première ». Après l'échec des premières mesures de Galilée, les mesures astronomiques de Rømer sur la période de révolution des satellites de Jupiter avait permis une détermination de l'ordre de grandeur de la vitesse de la lumière. Bradley avait notablement amélioré ces premières estimations en utilisant le phénomène d'aberration de la lumière.

Fizeau imagina un dispositif original: la lumière émise par une lampe de Drummond était envoyée, après réflexion sur une lame de verre semi-réfléchissante, à travers les dents d'une roue dentée vers un miroir situé à 8 kilomètres et demi de là; après réflexion sur le miroir, la lumière revenait à la station d'origine où elle repassait à travers la roue dentée. Si la roue ne tournait pas, le faisceau initial passant entre deux dents de la roue revenait après réflexion entre les deux mêmes dents. Par contre, si la roue tournait, le faisceau initial était haché par le passage des dents. Chacune des impulsions ainsi créées revenait à la station avec un peu de retard, et si la roue tournait assez vite, il se pouvait qu'une dent ait remplacé un intervalle entre deux dents pendant le trajet aller-retour de l'impulsion: le faisceau devenait inobservable. En faisant tourner la roue de plus en plus vite, on voyait réapparaître le faisceau (un intervalle ayant pris la place d'un autre), puis à nouveau disparaître, etc. Connaissant la vitesse de rotation de la roue dentée, le nombre de dents et la distance entre les deux stations (situées à Suresnes et à Montmartre), Fizeau réussit en 1849 à obtenir de premières estimations raisonnables de la vitesse de la lumière.

C'est à ce moment que Fizeau et Foucault reprennent la mesure de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. C'est aussi de cette époque que date le début d'une brouille durable entre les deux hommes, qui s'étaient pourtant bien entendus jusque là; cette brouille nourrira une âpre compétition scientifique... dont la Science sera finalement bénéficiaire. Dans le cas de la mesure air/eau, c'est Foucault qui l'emportera avec une expérience dont le principe est schématisé dans la figure 06 : un faisceau de lumière

solaire fournie par un héliostat effectuait un trajet aller-retour dans l'air et un autre dans l'eau; la comparaison des temps de parcours se faisait en envoyant ces faisceaux sur un miroir tournant à grande vitesse qui permettait de mettre en évidence une différence entre les temps de parcours.

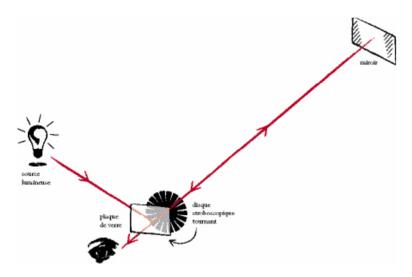


fig. 05

Représentation très schématique de l'expérience de la roue dentée de Fizeau.

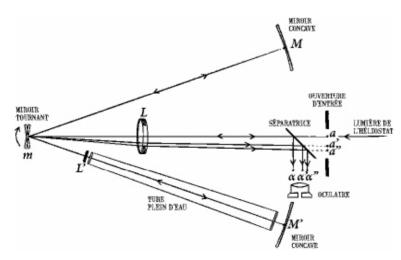


fig. 06

Principe de l'expérience imaginée par Foucault pour comparer les vitesses de la lumière dans l'eau et dans l'air.

L'expérience de Foucault tranchera définitivement en faveur de l'hypothèse ondulatoire : la lumière se déplace décidément moins vite dans l'eau que dans l'air ! Foucault reviendra en 1862 à la détermination de la vitesse absolue de la lumière en utilisant la technique du miroir tournant. Entre temps, l'expérience de la détermination de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau lui valut la Légion d'honneur, et servit de sujet à sa thèse de doctorat ès sciences, qu'il défendit à la Sorbonne en 1853, après l'expérience du pendule. Le jury, présidé par le célèbre chimiste Jean-Baptiste Dumas, comportait également le chimiste Balard, qui avait découvert le brome, et le physicien d'origine belge César Despretz. Il semble que Foucault n'ait pas répondu de façon très satisfaisante aux questions du jury, et en particulier à celles de Despretz, qui se montra très critique; il est vrai que dans le *Journal des Débats*, Foucault avait affirmé qu'une partie du travail de Despretz n'était pas nouveau, ou n'était que « patiente et insipide besogne » !

ENFIN VINT LE PENDULE...!

Ce qui devait apporter la gloire à Léon Foucault, c'est la fameuse expérience du pendule. Plus personne ne doutait de la rotation de la Terre sur son axe, mais aucune expérience directe ne l'avait jusque là mise en évidence. Bien sûr, il était beaucoup plus raisonnable de penser que la Terre tournait que d'imaginer que notre taupinière était au centre du Monde! Il y avait bien des preuves indirectes; ainsi, la circulation de l'air atmosphérique, et selon Babinet celle des courants océaniques, devait être influencée par la rotation de la Terre.

Plus directement, on proposa de mesurer la direction de la chute des corps par rapport à la verticale du lieu où se faisait l'expérience. On montre en effet que la rotation de la Terre a pour effet de faire apparaître dans les expériences de mécanique réalisées à sa surface des « pseudo-forces », qui, si l'on veut décrire les mouvements comme si on était dans un repère galiléen – c'est-à-dire en appliquant les lois de Newton –, doivent être ajoutées à la force de gravité. L'une de ces pseudo-forces dépend de la vitesse des corps et est appelée *force de Coriolis*; c'est elle qui est par exemple responsable de la circulation dans le sens horlogique des vents autour d'une zone de haute pression dans l'hémisphère nord. La présence de cette force doit influencer la trajectoire d'un projectile en mouvement, et en particulier compliquer la loi de la chute des corps. C'est un très petit effet; sous nos latitudes, une chute de 100 mètres doit conduire à une déviation de l'ordre du centimètre par rapport à la verticale.

Bien que délicate, l'expérience fut tentée à plusieurs reprises avec des hauteurs de chute croissantes, mais sans beaucoup de succès; il est difficile de s'affranchir des effets de la résistance de l'air par exemple sur des hauteurs qui ont atteint plus de 150 mètres! Le premier à essayer de la réaliser fut le célèbre Robert Hooke, dès 1679, sur une hauteur de 8 mètres. Citons aussi l'abbé Guglielmini (1793, chute de 78 mètres), Johann Benzenberg (1802, 76 mètres) et Reich (1831, 158 mètres). Le gros problème

de ce type d'expérience est que l'effet porte sur un temps relativement court (quelques secondes) et que les perturbations dues à la rotation de la Terre n'ont pas vraiment le temps de se manifester. Dans l'expérience du pendule de Foucault, chacune des oscillations du pendule ne conduit qu'à une petite déviation, mais chaque nouvelle oscillation œuvre dans le même sens et les effets cumulés deviennent spectaculaires.

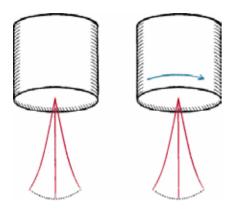
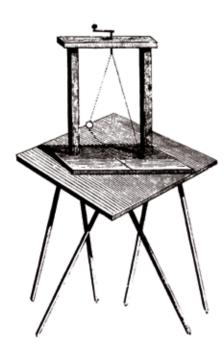


fig. 07

Le mouvement de vibration d'une tige métallique fixée dans un mandrin n'est pas affecté par la rotation de ce dernier.



La rotation du point de suspension d'un pendule ne modifie pas son plan d'oscillation.

Avant de réaliser son expérience, Foucault essaya de se convaincre de sa faisabilité. Il fit d'abord vibrer une tige métallique dans un mandrin, d'abord immobile, puis mis en rotation : contrairement à ce que laisse deviner un raisonnement intuitif, le plan de vibration de la tige n'est pas affecté par la rotation du mandrin! Il semble que cette expérience joua un rôle important dans la décision de Foucault de passer à une expérience «en grand». Comme dans l'expérience du mandrin, la rotation du fil de suspension ne joue aucun rôle dans l'expérience du pendule : Foucault le démontrait à l'aide d'un modèle réduit où le point de suspension du pendule était mis en rotation par une manivelle.

Foucault essaya alors un véritable pendule, d'abord dans la cave de sa maison parisienne. Le pendule n'avait que 2 mètres de longueur et la masse en mouvement n'était que de 5 kg. L'expérience eut entre autres à souffrir des vibrations parasites provenant des activités de la petite industrie locale, mais à en croire Foucault un premier résultat positif fut obtenu le 8 janvier 1851. Avec la permission d'Arago, Foucault s'établit ensuite dans une des salles de l'Observatoire, où il encourut des problèmes d'ordre mécanique : le fil se rompit. Pour éviter la rupture du fil, qui est soumis à de fortes contraintes (fatigue) au point de suspension, le dessin du support du fil fut amélioré. Le pendule avait cette fois une longueur de 11 mètres. Dès le 3 février, Foucault fit une communication dans les comptes-rendus de l'Académie, sous l'intitulé « Démonstration physique du mouvement de rotation de la Terre au moyen du pendule». Voici le préambule de cette communication : «Les observations si nombreuses et si importantes dont le pendule a été jusqu'ici l'objet, sont surtout relatives à la durée des oscillations; celles que je me propose de faire connaître à l'Académie ont principalement porté sur la direction du plan d'oscillation qui, se déplaçant graduellement, d'orient en occident, fournit un signe sensible du mouvement diurne du globe terrestre ». Foucault lança des invitations. Un journaliste, Terrien, rapporte: «À l'heure dite, j'étais au rendez-vous, dans la salle de la Méridienne, et j'ai vu tourner la Terre».

Si le pendule était situé au Pôle Nord, il est facile de se convaincre que le plan d'oscillation ferait un tour complet en un jour sidéral, soit 23 h 56 min environ. Les choses sont plus compliquées aux autres latitudes. Bien sûr, on voit que pour des raisons de symétrie le plan d'oscillation du pendule à l'équateur doit rester immobile par rapport au sol : en effet, vu du point de suspension, le plan du pendule tourne dans le sens horlogique au Pôle Nord et dans le sens antihorlogique au Pôle Sud. On s'attend donc par continuité à ce que la période de rotation de ce plan prenne une valeur intermédiaire aux autres latitudes. En fait le calcul montre 44 qu'en un point quelconque de la Terre, la période au Pôle doit être divisée par le sinus de la latitude λ du lieu; à Paris par exemple ($\lambda = 49^\circ$ N), le plan doit faire un tour complet en 31 h 47 min. Les premières mesures de Foucault sont compatibles avec cette prédiction.

⁴⁴ Nous n'aborderons pas dans cet article la grave question du « sin λ» qui suscita à l'époque bien des controverses.

Les salles de l'Observatoire se prêtaient mal à une véritable démonstration publique, et d'autre part la hauteur relativement modeste de la salle rendait l'expérience peu spectaculaire : plus le pendule est long et plus les effets dus à la rotation de la Terre sont manifestes; en effet, la période plus longue permet de mieux voir le déplacement entre deux oscillations successives. Une salle plus élevée que celle de l'Observatoire fut donc recherchée. Le Panthéon se prêtait idéalement à l'expérience; ancienne église transformée à la révolution française en «Temple destiné à recevoir les cendres des grands hommes », il comportait une impressionnante coupole culminant à près de 70 mètres du sol. L'édifice avait servi de refuge aux insurgés de la révolution de 1848 et était resté fermé depuis lors; il fallut donc obtenir une autorisation gouvernementale. À nouveau, Foucault s'enthousiasme : « Mais sous les voûtes élevées de certains édifices, le phénomène devrait prendre une splendeur magnifique. Nous avons trouvé dans le Panthéon un emplacement merveilleusement approprié à l'installation d'un pendule gigantesque ». Dans l'esprit de certains, le choix du Panthéon avait une valeur symbolique : c'était la victoire du rationalisme sur la foi, la preuve tangible que Galilée avait raison. Le journaliste Terrien proclame : « Entre les paroles de l'évêque et celles de *l'astronome, choisissez* ». Il semble que Foucault soit resté étranger à ces considérations, le choix du Panthéon n'ayant pour lui que des justifications purement techniques.



fig. 09

L'église Sainte-Geneviève, due à Soufflot, transformée à la Révolution française en Panthéon destiné à recevoir les cendres des grands hommes.

L'expérience fut mise en route dans le courant du mois de mars 1851. Au sommet de la coupole se trouve un «bouchon» donnant accès à l'intérieur de l'édifice, qui fut démonté pour laisser passage au fil de suspension, long de 67 mètres. On plaça au-dessus de l'ouverture une poutre de sapin de 40 centimètres de côté, supportant le fil de suspension qui avait une section de 1,4 millimètres. La boule du pendule avait 17 centimètres de diamètre et pesait 28 kg; elle était constituée d'une enveloppe de laiton remplie de plomb. Pour éviter les accidents (une boule de cette masse, animée d'un mouvement d'oscillation de plusieurs mètres, n'est pas sans danger), la zone de l'expérience était délimitée au sol par une balustrade en bois. Pour pallier les effets d'une rupture accidentelle du fil, Foucault avait disposé sur le pavement une couche de terre épaisse de 20 centimètres. Chacune des oscillations écartait la masse du pendule, à laquelle on avait attaché un stylet pour mieux identifier sa position, de 2,3 millimètres de la précédente; l'effet était donc bien visible. Dans son style inimitable, Foucault commente : « Tout homme, mis en présence du fait, converti ou non aux idées régnantes, demeure quelques instants pensif et silencieux, et généralement il se retire emportant par devers lui un sentiment plus pressant et plus vif de notre incessante mobilité dans l'espace ».

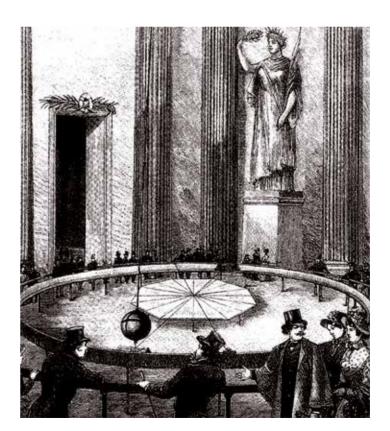


fig. 10 L'expérience du Panthéon en 1851.

Le succès fut immédiat : l'entrée était libre, et la foule se pressa pour voir le pendule; c'était souvent Foucault en personne qui servait d'animateur. On peut même parler d'une véritable « pendulomanie » : non seulement il fallait avoir assisté à l'expérience – c'était l'événement à la mode –, mais des pendules se mirent à osciller dans le monde entier ! Dès le 9 avril un pendule de Foucault oscillait à Londres, et dans les quelques mois qui suivirent on put en admirer à Oxford, Dublin ou Liverpool, à Rome, à Cologne, Gand et Bruxelles, à Rio de Janeiro, à Boston, New York et Washington, pour n'en citer que quelques-uns !

UNE EXPÉRIENCE SIMPLE ?

La réalisation d'un pendule de Foucault « qui fonctionne » est loin d'être évidente, et nombreux sont les mécaniciens amateurs qui s'y sont cassé les dents. Foucault lui-même avoue : « En passant de la théorie à l'expérience, le physicien doit s'attendre à des mécomptes; et, dans le cas présent, il devrait s'estimer très-heureux s'il parvient avec un pendule matériel à obtenir une déviation non équivoque dans le sens prévu ».

Les pièges sont multiples. La première difficulté est liée à l'amortissement du mouvement : la sphère et le fil se déplacent dans l'air et il y a donc frottement. Avec la grande sphère de 38 centimètres de diamètre – prise un temps à tort pour celle utilisée par Foucault en 1851, mais qui est en fait celle utilisée durant l'exposition universelle de Paris de 1855 –, l'amplitude des oscillations décroît d'un facteur 2 en un quart d'heure! Réutilisée en 1995 pour répéter l'expérience historique du Panthéon, elle a été remplacée en 1996 par une boule de 47 kg mais de plus petit diamètre (20 centimètres). Notons que son utilisation lors de l'Exposition de Paris ne fut rendue possible que par le recours à un dispositif électromagnétique entretenant les oscillations.

L'expérience montre que l'augmentation de la longueur du pendule ne garantit pas une diminution de l'amortissement (mais l'amortissement des grands pendules est partiellement compensé par des déplacements linéaires plus grands)!

Une seconde difficulté provient du fait que la moindre anisotropie du dispositif entraîne l'apparition de trajectoires elliptiques de l'extrémité du pendule. Cette anisotropie peut être liée à un manque de rigidité du support, ou encore à une inhomogénéité du fil au point de suspension; elle entraîne l'existence de deux directions d'oscillation privilégiées, qui correspondent à des périodes d'oscillation légèrement différentes. Quand le pendule oscille dans une direction ne coïncidant pas avec ces directions particulières, on peut considérer que son mouvement résulte de la combinaison de deux fréquences voisines, et il apparaît un *battement*: au lieu de se déplacer linéairement, le pendule décrit des courbes compliquées appelées *figures de Lissajous*.

On montre que l'anisotropie n'a que des effets négligeables pour les pendules de grande taille, mais elle devient critique et souvent gênante pour les petits pendules.

Un troisième problème, évoqué plus haut à propos des premières expériences de l'Observatoire, est associé à la fatigue du fil métallique au point de suspension : si le dispositif est mal conçu, toute la flexion se produit sur un tronçon de très petite taille du fil et celui-ci finit par se rompre. Cette mésaventure survint au Panthéon. Foucault rapporte : « On sait quel accident est venu interrompre le cours des observations qui se faisaient au Panthéon. À force de manœuvrer pour tout le monde du matin au soir, l'immense pendule a fini par se détacher; le fil qui le suspendait, long de 67 mètres, rompu en son point le plus élevé, s'est amoncelé sur le boulet en replis inextricables ». Cet incident mit fin aux expériences de façon durable; en effet, l'administration tarda à libérer les fonds réclamés pour la réparation, et après le coup d'État du 2 décembre, Louis-Napoléon, le futur Napoléon III, restitua le Panthéon à l'Église. Louis-Napoléon s'intéressait cependant à la Science, et peu de temps après, il accorda à Foucault une subvention de 10 000 francs destinée à encourager ses travaux.

LE GYROSCOPE

Si l'interprétation du mouvement du plan d'oscillation du pendule en l'un des pôles est très intuitive (la Terre y tourne sous les pieds !), il n'en va pas de même aux autres latitudes, et le sinus de la latitude a fait couler beaucoup d'encre. La complication





fig. 11

Le gyroscope de Foucault : à gauche un appareil à engrenages qui permet de lui communiquer une grande vitesse de rotation ; à droite l'appareil monté sur son support et muni d'un dispositif de mesure permettant de mettre son mouvement en évidence.

provient du fait que le point de suspension du pendule n'est pas fixe dans l'« espace absolu » qu'imaginait Foucault. C'est pourquoi ce dernier pensa à la réalisation d'un appareil dont le comportement serait plus simple à expliquer. En collaboration avec le fidèle Froment, qui avait aussi contribué à l'expérience du Panthéon, il réalisa le premier gyroscope – un défi pour l'époque car il fallait que les masses soient parfaitement équilibrées pour éviter des mouvements parasites de précession.

Foucault parvint à maintenir son gyroscope en rotation pendant une dizaine de minutes après son lancement à quelque 200 tours par seconde; cette durée est amplement suffisante pour observer l'effet de la rotation de la Terre. Le gyroscope n'en restera pas là : pendant des décennies ce sera un des instruments de base de la navigation maritime et aérienne.

LES COURANTS DE FOUCAULT

Si, à ce moment de sa vie, la notoriété de Foucault commence à s'affirmer, il n'occupe aucun poste officiel; il se contente des revenus que lui assurent ses comptes rendus des débats de l'Académie des Sciences dans le *Journal des Débats*. L'accès des journalistes aux documents de l'Académie est d'ailleurs supprimé en 1853. Ses premières tentatives d'obtenir un poste permanent, notamment au Conservatoire des Arts et Métiers et à la Sorbonne, se soldent par un échec.

En attendant des jours meilleurs, Foucault se rend en Grande-Bretagne en 1854, où il rencontre de grands noms de la science britannique, comme Michael Faraday, qui avait une soixantaine d'années à l'époque, et les jeunes William Thomson (le futur lord Kelvin) et John Tyndall. Foucault visitera à nouveau la Grande-Bretagne l'année suivante, pour y recevoir la prestigieuse médaille Copley, décernée par la *Royal Society* en récompense de ses travaux sur le pendule. Il s'entretient également avec William Lassell, un riche brasseur dont l'astronomie est devenue la passion; celui-ci possède un excellent télescope équatorial de 60 centimètres de diamètre – que Foucault examine sous toutes les coutures –, à l'aide duquel il a découvert Triton, le premier satellite de Neptune.

Foucault se tourne de plus en plus vers la recherche appliquée : ainsi il consacre la fin de l'année 1854 à comparer le pouvoir éclairant du gaz de tourbe et du gaz de houille à l'aide de photomètres. L'année qui suit est importante pour lui : Urbain Le Verrier, tout auréolé par la découverte de Neptune dont il a prédit l'existence en étudiant les perturbations du mouvement d'Uranus, est nommé à la tête de l'Observatoire de Paris, en remplacement de François Arago qui vient de mourir; il engage l'année suivante Léon Foucault au titre de physicien de l'observatoire. La cohabitation des deux hommes se révélera orageuse; Le Verrier, personnage très cassant, a un épouvantable caractère, et Foucault n'est pas homme à se laisser faire... Un des sujets de discorde est que Foucault entend garder son autonomie et continuer à se consacrer à des recherches personnelles.

Un des grands problèmes de l'époque, c'est de comprendre le lien entre mécanique et chaleur. Julius Mayer vient de mesurer l'équivalent mécanique de la chaleur et d'établir la première loi de la toute jeune thermodynamique. On comprend maintenant que quand un mouvement mécanique s'amortit, l'énergie qui semble avoir disparu s'est transformée en chaleur, c'est-à-dire en une autre forme d'énergie, associée cette fois aux mouvements des constituants microscopiques du système. Si cette interprétation est correcte, le freinage que subit un morceau de cuivre que l'on déplace entre les pôles d'un électro-aimant 45 doit lui aussi se traduire par une élévation de température!

Pour vérifier ces prédictions, Foucault utilise un de ses gyroscopes. Il constate d'abord que, placé entre les pôles d'un électro-aimant, le disque du gyroscope ne tarde pas à s'arrêter, ce qui était bien connu à l'époque. Puis il entraîne le disque du gyroscope à l'aide d'une manivelle pour entretenir le mouvement de rotation : le disque s'échauffe rapidement et devient finalement brûlant. Même dans ce cas un peu particulier, l'équivalence travail-chaleur se vérifie! L'expérience sera présentée par Jacques Babinet à l'Académie des Sciences le 17 septembre 1855. Pour rendre le phénomène plus spectaculaire, différents instruments sont proposés par les constructeurs, et notamment un récipient en cuivre, fermé par un bouchon et contenant de l'eau, que l'on fait tourner entre les pôles d'un électro-aimant : l'élévation de température porte l'eau à ébullition, ce qui fait sauter le bouchon!

Ce qui est un peu surprenant ici, c'est que, bien que cette expérience ne boule-verse pas la physique de l'époque, elle vaudra à Foucault – qui n'y voyait pourtant qu'une façon astucieuse d'illustrer un cours – une nouvelle notoriété : Napoléon III s'engage même à financer toutes les expériences futures du physicien, promesse qui, semble-t-il, ne sera que très partiellement tenue. Cependant cette expérience restera assurément un « classique » de la démonstration de la conservation de l'énergie et de la transformation du travail mécanique en chaleur.

LES AMÉLIORATIONS DE LA BOBINE D'INDUCTION DE RUHMKORFF

Foucault apportera aussi une importante contribution à l'amélioration du fonctionnement d'un instrument spectaculaire, qui comme le gyroscope ne connaîtra d'applications majeures que bien des années plus tard : la bobine de Ruhmkorff. Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803-1877) était un constructeur d'instruments scientifiques bien connu à Paris. D'origine allemande, il avait amélioré la construction de la bobine d'induction, ancêtre des transformateurs et des bobines d'allumage qui seront utilisées plus tard dans les automobiles. Cette bobine permettait d'obtenir, au départ du courant fourni par des piles, une tension de plusieurs dizaines de milliers de volts. Le principe de

~~ 74 ×~

⁴⁵ Ce n'est pas Foucault qui a découvert ce freinage, ni même son interprétation en termes de courants induits, qui est due à Michael Faraday.

fonctionnement en est le suivant : un important courant, interrompu plusieurs fois par seconde par un vibreur, parcourt un bobinage relativement court (« primaire ») constitué de fil de grosse section; un second bobinage (« secondaire »), comportant une très grande longueur de fil très fin entourant le premier, voit se développer à ses extrémités une tension induite importante. Si les bornes du secondaire sont reliées à un éclateur, on peut obtenir entre les armatures de ce dernier des étincelles de plusieurs centimètres; avec de grandes bobines la tension pouvait atteindre plusieurs centaines de milliers de volts et l'étincelle une longueur de plusieurs dizaines de centimètres!

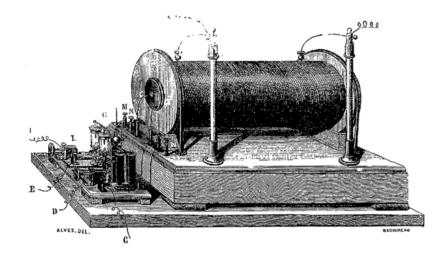


fig. 12

Une bobine de Ruhmkorff.

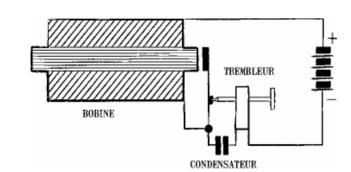


fig. 13

Première amélioration de la bobine de Ruhmkorff, due à Fizeau : l'ajout d'un condensateur limitant l'importance des étincelles aux bornes du rupteur.

Plus la variation du courant dans le primaire est rapide et plus la tension obtenue aux bornes du secondaire est importante. Dans les premières versions, le rupteur servant à « hacher » le courant du primaire était semblable au trembleur d'une sonnerie électrique. Cependant, les variations rapides de courant produisaient des effets d'auto-induction dans le primaire lui-même, et il apparaissait d'importantes étincelles aux bornes du rupteur, qui s'échauffaient au pont de se souder. Hippolyte Fizeau proposa d'ajouter un condensateur pour absorber une partie de ce courant – solution qui sera aussi adoptée plus tard dans le circuit d'allumage des automobiles; ce condensateur était constitué d'un empilement de feuilles d'étain alternant avec des feuilles d'isolant, la plupart du temps dissimulées dans le socle en bois de la bobine. Comme la solution n'était pas tout à fait satisfaisante, Foucault s'attaqua de façon plus directe au rupteur lui-même. Il tenta d'abord d'utiliser comme bornes une tige de platine et du mercure contenu dans un godet; cependant l'étincelle subsistait et le mercure s'échauffait et se vaporisait partiellement. Pour éviter cet échauffement et en même temps le contact des électrodes avec l'air et donc les problèmes d'oxydation, Foucault recouvrit le mercure d'une couche d'alcool; il parvint ainsi à obtenir 50 à 60 oscillations par seconde et un fonctionnement bien plus stable qu'avec un rupteur classique.

La bobine de Ruhmkorff jouera un rôle décisif dans le développement de la physique moderne : elle permettra l'étude systématique des décharges électriques dans les gaz raréfiés et — excusez du peu — la découverte de l'électron, des ondes hertziennes et des rayons X !

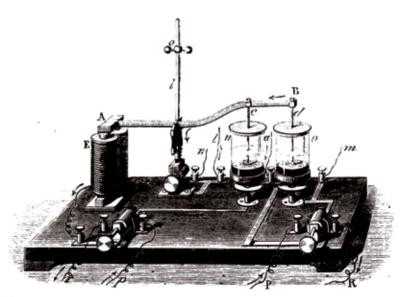


fig. 14
Un interrupteur double à mercure de Foucault.

─~~ 76 ∽~~

L'EXPOSITION DE 1855 ET LES DISQUES DES FRÈRES CHANCE

En 1855 a lieu à Paris une exposition universelle, que nous avons évoquée plus haut. Foucault y participe à un double titre : sa célèbre expérience du pendule y est présentée au public, mais il est de plus secrétaire du jury pour la section «industries concernant l'emploi économique de la chaleur, de la lumière et de l'électricité». Les grandes expositions de l'époque décernent en effet des médailles aux exposants les plus méritants qui, bien des années plus tard, continuent à rappeler leurs succès sur leurs produits.

L'exposition de 1855 rencontre un énorme succès : lors de son ouverture, le 17 mai, 150 000 personnes se pressent à l'ouverture; et c'est un total de 5 millions de visiteurs qui fréquenteront les nombreux palais. Nous avons déjà signalé que le mouvement de l'énorme sphère utilisée pour réaliser le pendule de l'exposition (diamètre de 38 centimètres) s'amortissait très rapidement, et qu'il fallut recourir à un dispositif électromagnétique pour entretenir le mouvement d'oscillation : à chaque passage de la boule de fer à son point d'équilibre, un électroaimant lui donnait une petite impulsion pour compenser l'énergie perdue.

Parmi les exposants de 1855 figurent les frères Chance, spécialisés entre autres dans la réalisation de phares lenticulaires pour la navigation maritime. Ils y exposent deux impressionnants disques de verre de 75 centimètres de diamètre, pesant 130 et 200 kg. Le premier est réalisé en « crown », l'autre en « flint », deux types de verre d'indices de réfraction différents qui pourraient servir à réaliser l'objectif achromatique d'une très grande lunette astronomique : on sait en effet depuis le milieu du XVIII^e siècle au moins que le principal problème des lunettes astronomiques, l'irisation des images qu'elles produisent et qui est dû à la variation de l'indice de réfraction du verre avec la longueur d'onde de la lumière, peut être largement résolu en accouplant deux lentilles d'indices de réfraction différents et de courbures appropriées (l'indice de réfraction moyen du crown est d'environ 1,52, tandis que celui du flint peut dépasser 1,70). Foucault fut désigné par Le Verrier, son nouveau patron, pour mesurer leur indice de réfraction exact et examiner la qualité optique des deux disques – essentiellement leur homogénéité –, en vue d'un achat éventuel pour réaliser une grande lunette pour l'Observatoire de Paris. Il consacra une grande partie de l'année 1856 à cette tâche difficile. Si le disque de crown était parfait, le disque de flint présentait quelques inhomogénéités, mais on décida finalement de les acheter. Dans un contexte d'ajournements successifs et de querelles incessantes avec Le Verrier, le projet de grande lunette ne verra jamais le jour ...

LE TÉLESCOPE À MIROIR DE VERRE ARGENTÉ

Si Foucault ne s'attaqua pas à la taille des disques des frères Chance, il semble que ce soit ce projet qui l'orienta vers la réalisation de miroirs concaves d'excellente qualité optique. En effet, le test des lentilles nécessitait l'étude de leurs propriétés de

focalisation d'un faisceau parallèle : en principe, selon les lois de l'optique géométrique, un tel faisceau doit converger en un point – le foyer – après avoir traversé la lentille, à condition, bien entendu, que le faisceau incident soit parfait. Sur le papier, les choses sont simples : un faisceau parallèle peut en principe être réalisé en plaçant une source lumineuse ponctuelle au foyer d'une seconde lentille, supposée elle-même parfaite; et le diamètre de ce faisceau doit être égal à celui de la lentille à tester. Il y a là un cercle vicieux, surtout si la lentille qu'on veut tailler est la plus grande qui ait jamais été réalisée : on ne possède précisément pas de lentille parfaite de même diamètre !

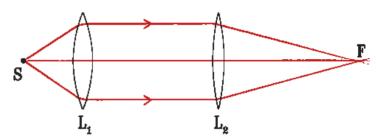


fig. 15

Représentation schématique du test d'une lentille L_2 : un faisceau parallèle préparé à l'aide d'une source ponctuelle S placée au foyer d'une lentille L, doit converger parfaitement au foyer F de la lentille testée.

Foucault réalisa qu'il était possible de contourner le problème : un faisceau parallèle peut aussi être construit à l'aide d'une source ponctuelle et d'un miroir concave sphérique parfait ⁴⁶. Et cette fois, le test de ce miroir peut être réalisé sans pièce d'optique auxiliaire. En effet, il suffit de placer une source ponctuelle au voisinage de son centre de courbure *C*; si la source *S* était placée exactement au centre de courbure son image *S'* coïnciderait avec *S*, mais si on déplace latéralement la source, son image se déplace de façon symétrique et peut être examinée.

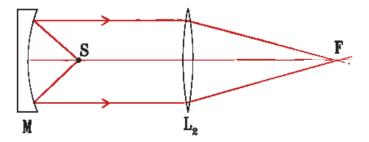


fig. 16

Test d'une lentille L_2 à l'aide d'un faisceau parallèle préparé en plaçant une source ponctuelle S au foyer d'un miroir sphérique M.

⁴⁶ En principe le miroir devrait être parabolique, mais il peut être remplacé par un miroir sphérique si sa distance focale n'est pas trop petite.

Pour réaliser les tests d'une lentille construite à partir des disques des frères Chance, il fallait bien entendu que le diamètre du miroir de test soit lui-même de 75 centimètres. Il existait à l'époque très peu de miroirs de ce diamètre. Il y avait bien le miroir de 60 centimètres du télescope que Foucault avait admiré chez Lassell, ou encore le miroir du télescope de Lord Rosse... À l'époque de Foucault, les miroirs étaient réalisés en bronze, qui avaient un pouvoir réfléchissant médiocre et dont la qualité optique ne le satisfaisait pas. Le perfectionnisme de Foucault ne pouvait pas s'accommoder de cette situation : il décida de se tourner vers un miroir de verre, susceptible d'un poli bien plus parfait. Il faudrait bien entendu le revêtir d'une couche réfléchissante pour le rendre utilisable, mais Foucault savait qu'il est relativement facile de recouvrir le verre d'une mince couche d'argent, et cette opération ne l'inquiétait donc pas.

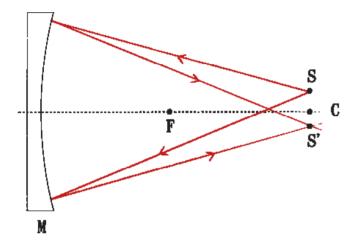


fig. 17

Test d'un miroir concave sphérique : on examine l'image S' de la source ponctuelle S au voisinage du centre de courbure du miroir (pour un miroir sphérique le foyer F est situé à mi-chemin du centre de courbure et du miroir).

La technique de taille d'un miroir de verre ne posait a priori pas de problème, puisqu'on savait déjà réaliser des lentilles : il suffit de frotter le bloc de verre du futur miroir sur un autre bloc («l'outil») en utilisant des émeris de plus en plus fins pour obtenir la forme voulue, puis de polir la surface doucie ainsi obtenue. À l'époque, le polissage de la surface s'obtenait en la frottant avec du papier recouvert de rouge d'Angleterre, un oxyde de fer constitué de particules très fines. La forme de deux surfaces qui s'épousent parfaitement quelle que soit leur position relative est nécessairement sphérique (ou plane), et c'est donc celle que prennent automatiquement les surfaces du miroir et de l'outil – du moins si aucun élément perturbateur n'est intervenu lors de la réalisation du miroir, comme par exemple des pressions irrégulières sur les disques lors du travail!

Foucault oublia rapidement, semble-t-il, sa motivation initiale – la taille des disques des frères Chance –, et il s'intéressa aux miroirs en tant qu'objectifs de télescope. L'utilisation de miroirs en astronomie avait jusque là été freinée par la faible réflectivité des miroirs métalliques. Mais une fois cette barrière levée, les miroirs se révélaient supérieurs aux lentilles à bien des égards : il n'y avait par exemple qu'une seule surface à tailler (au lieu de quatre pour un doublet achromatique), la qualité du verre pouvait être moindre que pour une lentille puisqu'il était utilisé par réflexion et non par transparence, la flexion de miroirs de grande taille sous leur propre poids pouvait être compensée en les soutenant par leur face arrière, ce qui était bien entendu impossible pour une lentille, ...; mais surtout, les miroirs étaient rigoureusement achromatiques, les lois de la réflexion ne dépendant pas de la longueur d'onde de la lumière.

Foucault se fit la main sur un miroir d'une dizaine de centimètres de diamètre et de 50 centimètres de distance focale. Il le présenta à la réunion annuelle de l'Association britannique pour l'avancement des sciences à Dublin, et profita de son déplacement en Irlande pour rendre visite à Lord Rosse et découvrir le « Léviathan de Parsonstown », le télescope géant de 1,80 mètres de diamètre. Avec son miroir de bronze et sa qualité optique limitée, l'engin n'impressionna pas Foucault, qui le qualifia de « blague ». Foucault rencontra également lors de son retour John Herschel, le fils du grand William.

De retour à Paris, Foucault s'attaqua à la réalisation d'un miroir de 18 centimètres de diamètre. Mais le directeur de l'Observatoire de Paris, Le Verrier, ne l'entendait pas de cette oreille : le travail pour lequel Foucault était payé – en particulier la taille des disques des frères Chance – n'avançait pas, et Le Verrier envoya plusieurs lettres acerbes à Foucault et au ministre responsable; dans une de celles adressées à Foucault, il écrit :

«[...] Je reconnais que vous travaillez dans votre cabinet particulier de la rue d'Assas; et sans doute, vos instruments y reçoivent les soins nécessaires. Mais le cabinet de l'Observatoire est laissé dans le plus grand désordre; vous y paraissez à peine quelques instants par semaine. Monsieur le ministre de l'instruction publique m'a fait savoir qu'il veut nous honorer d'une visite [...] Si rien n'est changé, Son Exc. ne rencontrerait le Physicien que par le plus grand des hasards. Il verrait le cabinet le plus désordonné de Paris. Sur les grands verres acquis, l'un ne pourrait être présenté; l'autre est relégué dans la poussière. [...] Je ne pourrais donc laisser se prolonger cet état de choses et avec lui l'exemple qui en résulterait.»

Ces récriminations n'eurent pas d'effet; Le Verrier essaya de congédier Foucault, mais celui-ci était protégé par l'Empereur et on aboutit finalement à une situation de compromis. Cependant, la taille des miroirs de verre avançait à grands pas; après les miroirs de 10 et 18 centimètres de diamètre, Foucault réalisa des miroirs de 32 et 36 centimètres, d'une distance focale de 3,50 mètres, qui lui donnèrent entière satisfaction. Pour quantifier les performances de ses télescopes, Foucault observait une mire constituée de traits parallèles pour évaluer leur pouvoir séparateur.

Il constata ainsi que ce dernier était d'une demi seconde d'arc pour le miroir de 36 centimètres, une performance remarquable si on sait que le pouvoir séparateur théorique d'un tel miroir est de 0,44 seconde d'arc.

Quel était donc le secret de Foucault ? Jusque là, la qualité des objectifs était testée sur la pièce finie, et un objectif défectueux était tout simplement rejeté. Foucault décida de tester ses miroirs tout au long du processus de polissage. Bien entendu, des moyens mécaniques conventionnels sont largement insuffisants, la forme du miroir devant avoir une précision de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière si on veut espérer atteindre la résolution théorique : il faut donc recourir à la lumière elle-même pour tester le miroir. Foucault testa différentes méthodes sur lesquelles nous ne nous étendrons pas ici; il s'arrêta finalement à la méthode « du couteau », universellement connue sous le nom de méthode de Foucault ou «foucaultage», et qui est encore utilisée aujourd'hui. Cette technique consiste à examiner l'image d'une source ponctuelle au voisinage du centre de courbure du miroir. Si le miroir est parfaitement sphérique, l'image S' de S est ponctuelle à l'approximation de l'optique géométrique; si on place la lame d'un couteau en S', un observateur placé juste derrière S' verra la surface du miroir s'éteindre uniformément. Tout défaut de surface se traduira par contre par une extinction non uniforme de la surface du miroir; l'art de l'opticien consiste donc à savoir interpréter les ombres qui apparaissent lors de l'introduction du couteau quand la surface est imparfaite. Notons que cette méthode est généralisable au test des miroirs paraboliques. L'intérêt majeur de la méthode est son extrême sensibilité : de très petits défauts de surface inférieurs à la longueur d'onde de la lumière se traduisent par l'apparition d'un jeu d'ombres spectaculaire; l'élimination progressive des défauts observés permet donc d'obtenir une surface quasiment parfaite.

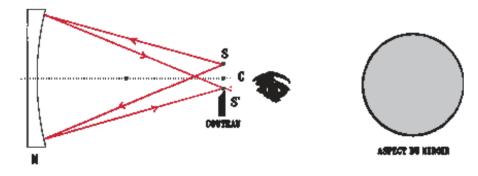


fig. 18
Principe de la technique du «foucaultage».

Parallèlement à cette technique ingénieuse, Foucault développa celle dite des « retouches locales ». L'examen détaillé de la surface du miroir permet de savoir où sont localisés les défauts éventuels et de mesurer leur importance; il est donc souvent inutile de retravailler toute la surface du miroir – il suffit de s'attaquer à la zone défectueuse. La technique des retouches locales est à la fois très puissante et très délicate : à ce niveau, la taille des miroirs de télescope confine à l'art; il n'est en effet que trop facile de transformer une « bosse » observée à la surface du miroir en un « trou » difficile à retoucher !

Foucault n'avait jusque là réalisé que des miroirs sphériques; il se lança dans la réalisation de miroirs paraboliques, dont un miroir de 33 centimètres de diamètre et de 2,25 mètres de distance focale, qui lui permit de résoudre le système triple de l'étoile y Andromedæ, dont les composantes les plus proches étaient alors distantes de 0,6 seconde d'arc. Il s'attaqua ensuite à la réalisation d'un miroir de 40 centimètres. Le bloc de verre provenait de la manufacture de Saint-Gobain, et la réalisation du miroir se déroula dans les ateliers de Secrétan, un célèbre fabricant d'instruments d'origine suisse établi à Paris, avec lequel Foucault collaborait. La plus grosse partie du travail fut effectuée par des ouvriers, mais c'est bien entendu Foucault qui procéda aux retouches locales et donna au miroir sa forme définitive. L'argenture faisait appel à un procédé chimique, dont il existe de nombreuses variantes; la couche d'argent est tellement mince que son dépôt ne modifie pas les qualités optiques de la surface du miroir. La monture équatoriale en bois fut réalisée par Wilhelm Eichens, chef d'atelier chez Secrétan. Les premiers essais, et en particulier l'examen de la surface lunaire, dépassèrent toutes les espérances. L'astronome britannique George Airy, qui participait aux observations, donne ses impressions dans un rapport destiné à la Royal Society:

«[...] L'image était brillante, et beaucoup de détails fins et délicats, aussi bien sur les parties volcaniques que sur les parties plus plates de la surface de la Lune, étaient visibles avec une clarté jamais atteinte encore. »

Avant sa mort, Foucault aura encore le temps de réaliser un grand miroir de 80 centimètres de diamètre, dépassant la plus grande lentille existante à l'époque, qui avait un diamètre de 52 centimètres (mais ne fut jamais utilisée). Les plus grandes lentilles équipant des lunettes en activité étaient celles des observatoires de Pulkovo, en Russie, et de Harvard, aux États-Unis, qui avaient 38 centimètres de diamètre. Le télescope fut terminé au début de 1862. Le nouveau télescope permit de séparer le compagnon de l'étoile la plus brillante du ciel, Sirius, qui n'est autre qu'une naine blanche de magnitude m=8,7, découverte l'année précédente par Alvan Clark, un célèbre constructeur de télescopes américain; son observation est très difficile parce qu'elle n'est distante de l'étoile principale que de 4 secondes d'arc et est noyée dans l'éclat de l'étoile principale.

Comme l'exploitation d'un tel télescope à Paris était malaisée à cause des conditions météorologiques qui y règnent, il fut finalement décidé de le transporter à Marseille, où il se trouve encore aujourd'hui mais n'y est plus utilisé à des fins scientifiques (il a été en service jusqu'en 1965).

Foucault a laissé dans le domaine de la fabrication des miroirs de télescope un riche héritage. Le verre a été remplacé par des matériaux à coefficient de dilatation pratiquement nul, et l'aluminium, déposé sous vide, a remplacé l'argent. Mais les techniques de base, bien que modernisées avec l'utilisation du laser et de fraiseuses numériques par exemple, sont essentiellement celles inventées par Léon Foucault.

LE PENDULE DE FOUCAULT : UN PEU DE THÉORIE

PIERRE GILLIS, FRANCESCO LO BUE & SOIZIC MÉLIN (UMONS)

Le pendule de Foucault a suscité un nombre incalculable d'études et de démonstrations mathématiques diverses. Pour les férus de physique, nous proposons ici quelques-unes de ces approches, complémentaires à celles abordées dans le chapitre « Voir tourner la Terre ».

Vu depuis la surface de la Terre, un objet se déplaçant en ligne droite devrait en réalité nous sembler être dévié (cf. article *Voir tourner la Terre* – expériences du manège de Coriolis, p. 18). Cette déviation, connue sous le nom de déviation de Coriolis, est cependant très petite et extrêmement difficile à mettre en évidence : la Terre tourne certes sur elle-même, mais très lentement. Si notre monde tournait beaucoup plus vite, il suffirait lancer une balle pour voir immédiatement l'effet de la rotation de la Terre sur sa trajectoire!

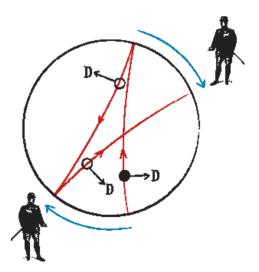


fig. 01

L'expérience du pendule de Foucault, vue du dessus. C'est l'accumulation de petites déviations D qui rend le phénomène de rotation du plan d'oscillation bien visible.

L'idée de Léon Foucault d'utiliser un pendule pour parvenir à voir cette déviation est tout simplement géniale : à chaque oscillation, le balancier est légèrement dévié mais de façon imperceptible; la succession des oscillations permet d'accumuler ces déviations infimes par rapport à la direction de départ, jusqu'à rendre l'effet de Coriolis parfaitement visible et même spectaculaire! La démonstration expérimentale offerte par le pendule de Foucault est donc parlante dans la mesure où elle se prolonge durant un certain temps.

LE PENDULE VU DEPUIS LA TERRE EN ROTATION

AU PÔLE

L'analyse précise de la rotation du plan d'oscillation du pendule n'est cependant simple que si on imagine le pendule placé au pôle – Nord ou Sud, peu importe. C'est en effet seulement dans ce cas que l'on peut dire que, par inertie, le pendule oscille dans un plan qui reste fixe par rapport aux galaxies les plus lointaines. Si le pendule est mis en mouvement dans la direction d'une de ces galaxies, son plan d'oscillation pointera donc en permanence dans sa direction, faisant fi de la rotation de la Terre, puisqu'a priori aucune force latérale susceptible de perturber le mouvement, ne s'exerce sur le balancier.

On peut se demander ensuite comment un observateur au sol verrait évoluer le pendule. Dit en termes plus physiques, que devient la trajectoire du pendule si elle observée depuis le référentiel qui accompagne la Terre dans sa rotation sur elle-même?

La réponse à cette question est essentiellement donnée dans la description de l'expérience du petit manège de Coriolis. Imaginons que l'un des deux enfants fasse rouler une balle imbibée de peinture fraiche le long d'un diamètre du carrousel. Comme le manège est en rotation, ce diamètre tourne également autour de son centre. Résultat: la balle, qui se déplace réellement en ligne droite, dessine sur le carrousel non pas une ligne droite, mais une courbe, voire une spirale si le carrousel tourne rapidement! Autrement dit, vu depuis le référentiel en rotation, la trajectoire rectiligne de la balle est vue comme systématique déviée. Il en est de même pour le pendule.

Toujours dans ce référentiel en rotation, puisque la direction de déplacement de la balle change, la vitesse de cette balle change aussi. La balle subit donc une accélération⁴⁷.

Dès lors, pour décrire le mouvement de la balle vu depuis le référentiel tournant, il faut tenir compte de cette accélération dite de *Coriolis*, liée précisément à la rotation du système de référence⁴⁸. Il est cependant important de prendre conscience que cette accélération n'est pas liée à la présence d'une «vraie » force (si on réserve l'usage du terme «force » aux interactions entre objets matériels). Il n'existe en effet pas de force réelle qui soit à l'origine de la déviation apparente de la balle!

Quittons le petit manège et revenons à l'expérience du pendule. Faisons osciller le pendule et essayons de comprendre pourquoi il se balance. Le pendule oscille parce qu'à chaque instant, la gravité et la tension dans le fil sont à l'origine d'une force de rappel qui tend à ramener la sphère à sa position d'équilibre (cf. fig. 02). En effet, la sphère, lâchée depuis sa position haute, est accélérée par la force de rappel. Emporté par son mouvement de plus en plus rapide, le balancier passe avec une vitesse maximale à son point d'équilibre, sans pouvoir s'arrêter. Il ralentit ensuite, toujours sous l'effet de la force de rappel, jusqu'à s'arrêter et rebrousser chemin en gagnant à nouveau de la vitesse, etc. En l'absence de frottement, ce mouvement périodique n'aurait aucune raison de disparaître. Quant à la durée d'un aller-retour – la période –, elle ne dépend que de la longueur du fil et de la planète sur laquelle est réalisée l'expérience.

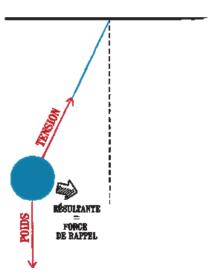


fig. 02

Le mouvement oscillant d'un pendule est lié à l'existence d'une force de rappel, qui pointe toujours vers la position d'équilibre. Cette force de rappel résulte des deux forces qui agissent sur la sphère : le poids, toujours orienté verticalement vers le bas, et la tension dans le fil.

⁴⁷ La vitesse change non seulement en direction mais aussi en grandeur, puisqu'au fur et à mesure que la balle se rapproche du bord du manège, sa vitesse linéaire augmente, puisqu'elle s'éloigne du centre du manège.

⁴⁸ Notons aussi que le changement de référentiel exige en principe aussi la prise en compte d'une autre force dite fictive, la force centrifuge. Toutefois, on peut montrer que cette dernière ne fournit qu'une contribution négligeable.

CHANGEONS DE RÉFÉRENTIEL

Or, le pendule ne se contente pas d'osciller. Son plan d'oscillation, observé depuis le sol, dérive progressivement. Donc pour décrire cette déviation de Coriolis, l'expérimentateur est obligé de faire appel à la force - fictive - de Coriolis, outil puissant pour prendre en considération l'effet de la rotation du référentiel. Cette force doit être considérée comme perpendiculaire à la fois à l'axe de rotation et à la vitesse de déplacement de l'objet considéré. Son expression est donnée par le produit vectoriel suivant \vec{F}_{cor} = -2 $\vec{\omega} \times \vec{v}$, où \vec{v} est la vitesse de déplacement de l'objet étudié dans le référentiel tournant avec la vitesse angulaire $\vec{\omega}$. L'origine de cette expression sort du cadre de cet ouvrage.

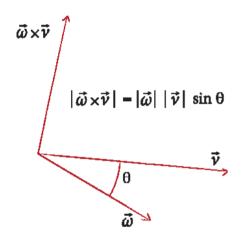


fig. 03

D'une manière générale, la notation $\vec{\omega} \times \vec{v}$ désigne le produit vectoriel des vecteurs $\vec{\omega}$ et \vec{v} , qui est un vecteur perpendiculaire à $\vec{\omega}$ et à \vec{v} , et dont le sens est donné par la règle dite du « tire-bouchon ». Sa longueur est égale au produit des longueurs des vecteurs $\vec{\omega}$ et \vec{v} et du sinus de l'angle θ que ces vecteurs font entre eux.

Historiquement, le raisonnement a joué en sens inverse : Foucault a précisément imaginé l'expérience du pendule pour que la déviation due à l'accélération de Coriolis soit facilement observable, prouvant ainsi à l'observateur que son référentiel tourne réellement !

Pour étudier le mouvement réel de la sphère du pendule par rapport à un plan horizontal (cf. *fig. 03*), nous savons maintenant qu'il est donc nécessaire de considérer que cette sphère est soumise à chaque instant à la force de rappel dirigée vers la position d'équilibre, ainsi qu'à la force de Coriolis. La résultante de ces deux forces permettra à la fois de retrouver le mouvement d'oscillation de la sphère et de quantifier la rotation de son plan d'oscillation. Pour étudier en détails la rotation du plan d'oscillation, il faudra extraire la composante perpendiculaire au mouvement de cette force totale, puisqu'elle en est la seule responsable.

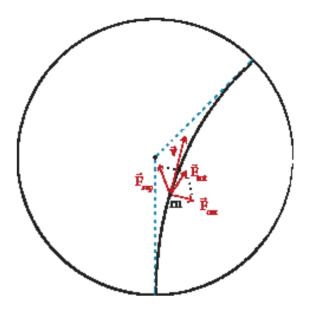


fig. 04

Vu du dessus, au pôle Nord, la sphère de masse m du pendule n'oscille pas le long d'une droite. La trajectoire d'un aller simple est représentée par le trait curviligne; le point noir au centre du schéma représente la position d'équilibre du pendule. Le vecteur vitesse \vec{v} est tangent à la trajectoire. La force de rappel \vec{F}_{rap} est dirigée vers le point d'équilibre, tandis que la force de Coriolis \vec{F}_{cor} est perpendiculaire à la vitesse et donc à la trajectoire. La résultante \vec{F}_{lot} a une composante parallèle à la trajectoire (c'est elle qui produit le mouvement d'oscillation) et une composante perpendiculaire qui produit la déviation vers la droite.

SOUS D'AUTRES LATITUDES...

Lorsqu'on quitte le pôle, il n'est plus possible de se représenter aussi simplement l'effet de la rotation de la Terre. L'image simple selon laquelle le plan d'oscillation du pendule de Foucault est fixe par rapport aux étoiles lointaines n'est plus vraie, contrairement à ce que l'on lit parfois dans la littérature.

Le plan d'oscillation du pendule de Foucault installé à Mons ne peut mécaniquement pas rester fixe par rapport aux étoiles puisque le pendule est contraint d'une part par le fait que son point d'attache est fixé à la collégiale qui tourne avec la Terre, et d'autre part par le fait que son câble, sous l'effet de la gravité, doit rester vertical à chaque instant. En d'autres termes, le plan d'oscillation du pendule doit à tout moment être perpendiculaire au sol, tout en étant emporté par la rotation terrestre : il ne peut donc pas rester fixe par rapport aux étoiles lointaines !

Dès lors, la déviation du plan d'oscillation observée à Mons n'est pas simplement le fruit du changement de référentiel, comme dans le cas du pendule au pôle. Au pôle, la déviation apparente du plan d'oscillation du pendule peut être qualifiée de virtuelle, car uniquement due au changement de référentiel. Cette déviation n'est effectivement qu'apparente, et est décrite par l'accélération de Coriolis qui tient compte de ce changement. Par contre, à une autre latitude, comme celle de Mons, à cet effet virtuel s'ajoute un effet réel, puisque le plan d'oscillation ne peut garder sa direction fixe par rapport aux étoiles lointaines. Cette modification réelle de la direction du plan entraine une modification de la direction de la verticale locale autour de laquelle oscille le pendule. Or, comme le calcul prend déjà en considération la composante horizontale de la force de rappel (perpendiculaire à la verticale locale donc), cela signifie qu'implicitement, ce calcul prend donc bien en considération l'effet réel.

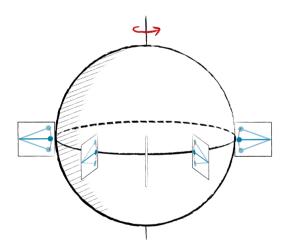


fig. 05

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! Changer de latitude induit un effet réel sur le mouvement du pendule, qui s'ajoute à l'effet virtuel lié au fait d'observer le pendule depuis un référentiel en rotation.

Dès lors, concentrons-nous sur l'effet virtuel perçu à la latitude de Mons. La force de Coriolis est localisée dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre et agit perpendiculairement à la vitesse de l'objet considéré. Mais comment est orientée la force de Coriolis agissant sur le pendule dans la collégiale ? En fait, la verticale locale n'est pas dans la même direction que l'axe de rotation de la Terre. La force de Coriolis présente donc une composante $\vec{F}_{cor,\,h}$ localement horizontale (donc tangente à la sphère terrestre) et une composante localement verticale, qui ne joue aucun rôle dans le mouvement, puisque son seul effet est de modifier la tension dans le câble de suspension du pendule.

Lorsque le pendule oscille de l'Est vers l'Ouest (cf. fig. 06 gauche), projeter l'accélération de Coriolis sur un plan horizontal revient à multiplier sa grandeur par le sinus de la latitude : $sin \lambda$, où λ est la latitude du point où se trouve le pendule. Si le pendule oscille du Nord vers le Sud (cf. fig. 06 droite), l'accélération de Coriolis n'a pas de composante verticale, mais le même facteur $sin \lambda$ apparaît cette fois dans le calcul de l'accélération elle-même (le calcul de cette accélération fait apparaître le sinus de l'angle qui est compris entre les vecteurs vitesse de déplacement \vec{w} et vitesse angulaire de rotation \vec{v}). Il est possible de démontrer, mais cela sort du cadre de cet ouvrage, que ce facteur $sin \lambda$, se retrouve même dans le cas général (c'est-à-dire quand la direction de l'oscillation est quelconque).

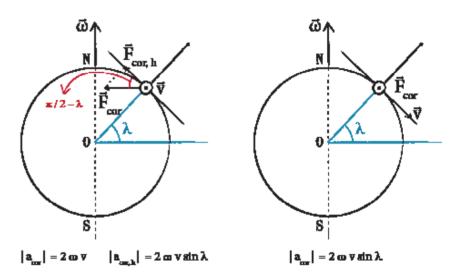


fig. 06

Deux cas particuliers de l'expérience du pendule de Foucault réalisée à Mons ($\lambda \approx 50^{\circ}$).

À gauche, le pendule oscille le long d'un parallèle dans la direction Est-Ouest (dans la figure il se dirige vers l'Ouest). Les deux vecteurs $\vec{\omega}$ et \vec{v} sont perpendiculaires ; la grandeur de l'accélération de Coriolis est égale à 2 ω v et sa composante horizontale est donc égale à 2 ω v cos $(\pi/2 - \lambda) = 2 \omega$ v sin λ .

À droite, le pendule oscille le long d'un méridien dans la direction Nord-Sud (dans la figure il se dirige vers le Sud); les deux vecteurs et font entre eux un angle π – λ et la grandeur de l'accélération de Coriolis – qui ici est parallèle au plan horizontal – est égale à 2 ω v sin λ .

En un point quelconque de l'hémisphère Nord, la figure 06, reste correcte mais la composante de la force de Coriolis contribuant effectivement à la rotation est multipliée par le facteur $sin \lambda$. La déviation pendant une demi-oscillation est donc

-~≥ 90 >>~

égale à celle obtenue au pôle, multipliée par $\sin \lambda$ (où $0 \le \sin \lambda \le 1$). Il faudra donc davantage de périodes pour que le plan de l'oscillation fasse un tour complet. En effet, si la déviation correspondant à un aller simple est multipliée par $\sin \lambda$, le nombre d'oscillations à effectuer sera divisé par $\sin \lambda$, et il en sera de même pour la période de rotation du plan :

$$T_{\text{rotation du plan d'oscillation}} = \frac{T_{\text{rotation de la Terre}}}{\sin \lambda}$$

À l'équateur, où $\lambda=0^\circ$ (latitude nulle), on n'observera aucune rotation du plan d'oscillation. En effet, à l'équateur : $\lambda=0^\circ$ donc sin $0^\circ=0$, donc la période du plan d'oscillation est infinie ; donc le plan d'oscillation ne tourne pas.

Aux pôles, la période de rotation du plan d'oscillation égale à 24 h. En effet, aux pôles : $\lambda = 90^{\circ}$; donc sin $90^{\circ} = 1$; donc la période d'oscillation est égale à la période de rotation de la Terre soit 24 h.

LE PENDULE VU DEPUIS UN RÉFÉRENTIEL INERTIEL

AU PÔLE

Observé depuis un référentiel « fixe » ou « inertiel », c'est-à-dire un repère attaché aux galaxies les plus lointaines, le mouvement du pendule aux pôles est très simple : le balancier oscille dans un plan fixe, alors que le plan local de l'expérimentateur terrestre – le sol – tourne en 24 h.

SOUS D'AUTRES LATITUDES...

À une latitude différente des pôles et de l'équateur, les choses se compliquent. Le plan local de l'expérimentateur (le sol), à la condition qu'il soit lié à la rose des vents locale, tourne également sur lui-même à cause de la rotation de la Terre, mais pas en 24 h. Cette observation, bien réelle, est troublante, mais nous vivons sur une sphère, et sommes sujets à certains effets contre-intuitifs.

Dans un article de 1972 publié par la *Royal Astronomical Society*, W. B. Sommerville présente une façon élégante d'estimer la vitesse de rotation de ce plan local, ou ce qui revient à la même chose, la vitesse apparente de rotation du plan d'oscillation du pendule.

Installons notre pendule à un point P de latitude λ (cf. *fig. 07*). Après un petit laps de temps, la Terre a tourné d'un petit angle δt ; le point P se retrouve un peu plus à l'Est, en un pt P', toujours à la même latitude.

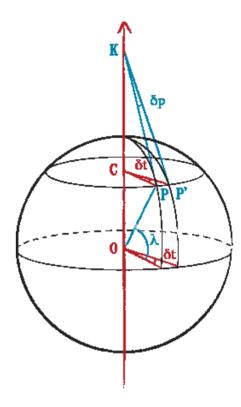


fig. 07

Lorsque la Terre a tourné d'un angle δt , le pendule situé à la latitude λ se déplace de P en P'. Le plan local, initialement tangent en P, a tourné quant à lui d'un angle δp .

Supposons que le pendule soit mis en mouvement dans la direction du méridien local, soit suivant un axe Nord-Sud.

Peut-on imaginer qu'observée d'un référentiel inertiel à l'instar de ce qui se passe au pôle, l'oscillation conserve sa direction initiale, autrement dit que le mouvement reste parallèle à lui-même en première approximation ? Non : à tout instant, le pendule oscille dans un plan local qui est vertical. La rotation de la Terre a pour conséquence que, observé d'une étoile lointaine, le plan vertical à l'instant initial ne soit plus vertical un instant plus tard, car la verticale a changé de direction.

On peut alors, contraint et forcé, tenter « d'atténuer » les exigences de l'inertie, en avançant l'idée que l'oscillation se poursuit en restant le plus possible parallèle à ce qu'elle était. Le plus possible ? Oui, en ajoutant l'idée que ce « plus possible » correspond à rester dans ce qui était la direction nord-sud initiale. Il faut dès lors

se demander comment cette direction nord-sud varie dans le référentiel local, celui qui est lié à la collégiale. La réponse se trouve dans la figure 07: lorsque la Terre tourne d'un angle δt autour de son axe, la direction nord sud tourne de l'angle δp .

En raisonnant avec les différents triangles et en supposant que l'intervalle de temps nécessaire pour que P passe en P' est très petit, on trouve que :

Dans KPP', $\delta p=PP'/KP$ Dans CPP', $\delta t=PP'/CP$

Dans le triangle rectangle OPK, l'angle au sommet K est λ , et on obtient $\sin \lambda = \text{CP/KP}$. Et on trouve donc la relation entre δp et δt : $\delta p = \text{PP'/KP} = (\text{PP'/CP})(\text{CP/KP}) = \delta t \sin \lambda$

Au cours d'une rotation complète de la Terre, les petits δp s'additionnent, et l'angle total duquel aura tourné le plan local sera donc : $p=360^\circ$ sin λ

En 24 h, le plan local a effectué un tour complet aux pôles (p = 360° sin λ , donc p = 360° sin 90°, soit p = 360°, on a bien un tour complet du plan local et donc du plan d'oscillation). Après 24 h, le plan local n'a toujours pas bougé à l'équateur (p = 360° sin λ , donc p = 360° sin 0°, donc p = 0°). Entre ces deux latitudes, après 24 h, le plan local a tourné de moins d'un tour (p = 360° sin λ où $0 \le \sin \lambda \le 1$). Il faudra donc attendre plus d'une journée pour que le plan d'oscillation boucle un tour complet, 31 h exactement à Mons, soit environ une journée et un quart.

PENDULE ET GRANDEURS PHYSIQUES

CLAUDE SEMAY (UMONS)

Le pendule est un dispositif qui, comme le montre cet ouvrage, a beaucoup servi le développement de la science. Sa simplicité cache une richesse qui en fait un cas d'école pour de nombreux problèmes physiques. L'analyse dimensionnelle en constitue un exemple flagrant.

LES GRANDEURS DIMENSIONNÉES

La mesure d'une grandeur physique ne peut généralement pas être donnée par un nombre pur uniquement ; elle est caractérisée par une *dimension* qui précise sa nature. Ainsi, la distance entre deux points de l'espace est une grandeur possédant la dimension d'une longueur, que l'on note généralement L. On devra donc choisir une *unité* de longueur : mètre (m), centimètre (cm) ou année-lumière (a.l.), par exemple. La *formule de dimension* (ou *dimension* tout simplement) d'une aire est une longueur au carré, c'est-à-dire $L \times L$ ou L^2 . L'unité peut être le centimètre carré (cm²), le mètre carré (m²), ou – pourquoi pas – le centimètre fois mètre (cm×m). Bien que peu pratique à utiliser, cette unité est tout à fait licite ⁴⁹.

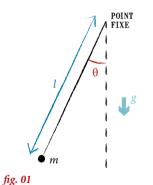
Dimensions de base		Exemples de dimensions dérivées	
Longueur	L	Vitesse	$ m L~T^{ ext{-}1}$
Temps	Т	Accélération	L T ⁻²
Masse	М	Force	M L T ⁻²

⁴⁹ On peut très bien imaginer des unités d'aire encore plus curieuses. On pourrait choisir comme unité celle d'un cercle dont le rayon (ou le diamètre, ou la circonférence) vaut une (ou 2, ou π) unité(s) de longueur.

Les trois dimensions de base utilisées en mécanique ⁵⁰ sont la *longueur*, le *temps* et la *masse*. Une vitesse, définie par le quotient d'une distance par un temps, a donc la dimension L/T ou L T⁻¹. Des unités possibles sont le mètre par seconde (m/s) ou le kilomètre par heure (km/h), par exemple. Certaines grandeurs sont caractérisées par le fait qu'elles ne possèdent pas de dimension, comme un angle ou un indice de réfraction ⁵¹. Leur dimension sera simplement notée 1. Le fait que la plupart des quantités intervenant dans les formules de physique possèdent des dimensions contraint très fortement la structure de ces formules. L'étude de ces contraintes porte le nom d'*analyse dimensionnelle*. Celle-ci repose sur le postulat – très raisonnable – que la formulation des lois de la physique doit être indépendante du choix des unités. Nous allons maintenant appliquer cette technique à l'étude du pendule simple.

LE PENDULE SIMPLE

Un pendule simple est constitué d'un corps, supposé ponctuel, attaché à un fil inextensible de masse négligeable dont l'autre extrémité est fixe, le tout oscillant dans un champ de pesanteur constant et uniforme. Pour simplifier le problème, on suppose que le pendule oscille dans le vide, de manière à ne pas devoir tenir compte de la résistance de l'air. On cherche à déterminer la période p de ce pendule en fonction des variables mises en jeu. Énumérons d'abord celles qui définissent le dispositif : sa longueur l et sa masse m. L'angle de déviation maximal θ à partir de sa position d'équilibre définit l'état d'oscillation du pendule. Enfin, l'accélération de la pesanteur g détermine le champ de force extérieur. Si on dresse alors – sans avoir fait la moindre expérience – le tableau des variables et de leur formule de dimension, on obtient :



Variable	Symbole	Dimension
Période	p	Т
Longueur du pendule	l	L
Masse du pendule	m	М
Angle de déviation maximal	θ	1
Accélération de la pesanteur	g	$ m L~T^{ ext{-}2}$

⁵⁰ On ne parlera pas ici des grandeurs dimensionnées ni des unités utilisées en thermodynamique ou en électromagnétisme.

Examinons d'un œil critique le choix de ces grandeurs. On s'est débarrassé de la taille et de la densité de la masse oscillante en la choisissant ponctuelle. De même, le poids, l'épaisseur et la tension du fil sont supposés ne pas intervenir. Ces hypothèses sont-elles physiquement significatives ? D'autres variables n'interviennent-elles pas ? Heureusement pour le phénomène simple étudié ici, les grandeurs du tableau ci-dessus sont suffisantes. On peut se douter que pour des systèmes physiques plus réalistes ou plus complexes, le choix des variables caractéristiques est crucial pour obtenir des informations pertinentes par l'analyse dimensionnelle.

Dans sa formule de dimension, la période *p* ne contient pas la masse M, et cette masse ne figure que dans une seule grandeur, *m*. Il est par conséquent impossible d'éliminer la masse de l'expression de la période en combinant différentes grandeurs. On est donc confronté à deux possibilités : ou bien la masse n'intervient pas dans le problème, ou bien il manque dans la liste une ou plusieurs variables contenant la masse. C'est à l'expérience de décider, et elle le fait en faveur de la première hypothèse. L'angle de déviation ne possédant pas de dimension, l'analyse dimensionnelle ne peut nous fournir aucune indication quant à la manière dont il interviendra dans la formule finale.

On veut obtenir une égalité donnant p en fonction de l, θ et g. Pour que les dimensions puissent coïncider dans chaque membre de l'égalité, on doit avoir $p = f(\theta) l^x g^y$, où $f(\theta)$ est une fonction arbitraire de θ , et où les exposants x et y sont a priori inconnus. En effet, la formule correspondante en termes des dimensions impose (la dimension de $f(\theta)$ est bien entendu 1) $T = L^x (L T^2)^y = L^{x+y} T^{2y}$.

Ceci implique donc que
$$\begin{cases} 0 = x + y \\ 1 = -2y \end{cases}$$
, dont l'unique solution est $x = 1/2$ et

y = -1/2. La relation recherchée est par conséquent $p = f(\theta) \sqrt{\frac{l}{g}}$. Cette méthode,

fort simple, procure déjà beaucoup d'informations sur la loi. On constate ainsi que pour doubler la période, pour une amplitude donnée θ , il faut multiplier la longueur du fil par quatre.

LES PETITES OSCILLATIONS

Une étude expérimentale est maintenant nécessaire pour déterminer la structure de la fonction $f(\theta)$. Si on se limite à des petites oscillations (inférieures à 10°), on constate que la période ne varie pratiquement pas avec l'angle de déviation maximal θ . La fonction $f(\theta)$ peut alors remplacée par une constante. Des mesures expérimentales soigneusement effectuées montrent que cette constante vaut approximativement 6,28. Il n'y a rien d'étonnant à cela car l'étude dynamique du

⁵¹ En fait, un angle exprimé en radians est défini par le quotient de la longueur de l'arc qui le représente par le rayon du cercle contenant l'arc. Le rapport de deux grandeurs de même dimension est évidemment sans dimension. De même, l'indice de réfraction peut être défini par le quotient de deux vitesses (la vitesse de la lumière dans le vide par la vitesse de la lumière dans le milieu considéré). La notation 1 pour l'absence de dimension est ainsi justifiée.

pendule simple, à l'approximation des petites oscillations, montre que la période est donnée par la relation suivante $p=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. Si on connaît la valeur de g en mètre par seconde carrée, on peut calculer la période en seconde, pour autant qu'on utilise, dans la formule, l donné en mètre. Eh oui! Après s'être occupé des dimensions, il faut prendre garde aux unités.

Signalons une curiosité : la loi donnant la fréquence angulaire ou pulsation du pendule, c'est-à-dire la grandeur $\omega=2\pi/p$, est donnée par $\omega=\sqrt{\frac{g}{l}}$. Dans ce cas très particulier, l'analyse dimensionnelle fournit directement la loi exacte.

DE L'UTILITÉ DE L'ANALYSE DIMENSIONNELLE

On peut constater, sur ce cas d'école qu'est le pendule simple, que l'analyse dimensionnelle peut fournir de précieuses informations sur la structure d'une loi que l'on cherche à établir. On a pu également constater les limites de la méthode, qui ne dispense généralement pas l'ingénieur ou le chercheur d'une analyse détaillée du phénomène étudié. L'analyse dimensionnelle est en fait surtout utilisée comme un puissant moyen de contrôle des formules de physique. Si les deux membres d'une égalité n'ont pas la même formule de dimension, l'équation est à coup sûr erronée. Il en va de même si on additionne deux termes de dimensions différentes ou si une grandeur dimensionnée intervient en argument d'une fonction autre que la fonction puissance. Il faut malheureusement constater que cette technique est bien souvent oubliée ou ignorée de nombreux étudiants, qui se privent ainsi d'un extraordinaire outil de vérification.

Bibliographie

- Michel Dubesset, Le manuel du Système international d'unités, Éditions Technip, 2000.
- Jean-Marc LÉVY-LEBLOND, On the Conceptual Nature of the Physical Constants, Rivista Del Nuovo Cimento, vol. 7, n° 2, Aprile-Giugno 1977, p. 187-214.
- Jean-Marc Lévy-Leblond, Dimensional angles and universal constants, American Journal of Physics, vol. 66, n° 9, September 1998, p. 814-815.
- Gabriel Monod-Herzen, L'analyse dimensionnelle et l'épistémologie, Maloine-Doin éditeur, 1976.
- Michael Parkinson, An Axiomatic Approach to Dimensions in Physics, American Journal of Physics, vol. 32, n° 3, March 1964, p. 200-205.

ROTATION DE LA TERRE ET MÉTÉO

FABIAN DEBAL (INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE DE BELGIQUE – IRM), FRANCESCO LO BUE & SOIZIC MÉLIN (UMONS)

Qui n'a jamais entendu parler de cyclones et d'anticyclones? Chaque jour, les cartes météo nous montrent l'évolution d'étonnantes spirales nuageuses autour des cyclones. Aussi étrange que cela puisse paraître, la rotation de la Terre influence de manière très importante la dynamique atmosphérique.

La force de Coriolis induite par la rotation de la Terre joue un rôle capital en météorologie. Elle intervient de manière significative dans la circulation de l'air à grande échelle que constitue le vent. Celui-ci naît des différences de pression qui apparaissent à la surface de notre globe, notamment en raison des disparités de température. On distingue des zones de haute pression (anticyclones) et de basse pression (dépressions).

Suite à certains processus dynamiques, l'air peut diverger (cf. *fig. 01*) en haute altitude⁵². Le déficit d'air créé suite à cette divergence diminue le poids de la colonne d'air sous-jacente. Or, comme la pression atmosphérique au sol est directement liée au poids de cette colonne d'air, on assiste à la formation d'un minium local de pression en surface : cette dépression conduit dès lors à une aspiration de l'air environnant. Le mouvement des nuages qui apparaissent sur les photos satellites est régi par cette aspiration.

La formation des anticyclones est, au contraire, liée à l'existence d'une zone de convergence en altitude qui crée localement un surplus d'air, et donc une haute pression en surface suite à l'augmentation du poids de la colonne d'air (cf fig. 02). Précisons que les anticyclones ne comportent généralement pas de structures nuageuses aussi marquées que celles observées dans les dépressions.

Dans l'hémisphère Nord, la force de Coriolis dévie vers la droite l'air en mouvement (dans l'hémisphère Sud, elle conduit à une déviation vers la gauche)⁵³.

⁵² Une telle zone peut s'étendre sur une surface équivalente à plusieurs fois celle de la Belgique!

⁵³ Un raisonnement plus précis devrait également prendre en considération le frottement des masses d'air sur le sol.

DÉPRESSION

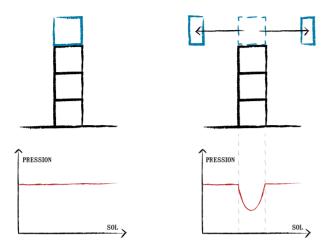


fig. 01

À gauche, la situation de départ. On imagine l'atmosphère à l'équilibre. La pression au sol est liée au poids de la colonne d'air. Cette pression est donc la même en tout point de la surface du sol.

À droite, une divergence est apparue en altitude; de l'air est expulsé du sommet de la colonne. Le poids de la colonne s'en trouve diminué, conduisant alors à un minimum local de pression, c'est la dépression.

ANTICYCLONE

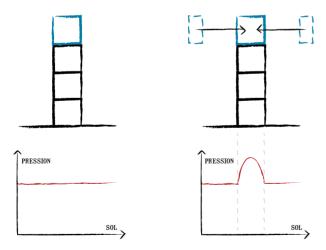


fig. 02

À gauche, la situation de départ identique à celle de la figure concernant la dépression. À droite, une convergence apparait en altitude qui conduit à un apport d'air en haut de la colonne. Ce surplus d'air est à l'origine d'une augmentation de la pression au sol : il s'agit de l'anticyclone.

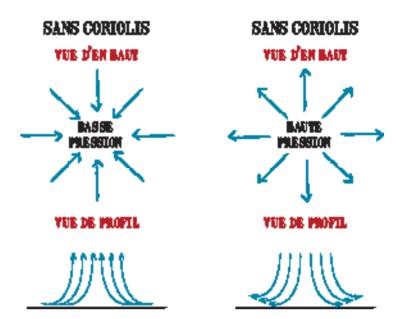


fig. 03

AVEC CORTOLIS (MÉNISPUÈNE NOND) RASSE PRESSION Sens contraire das signifies d'une montre AVEC CORTOLIS (MÉNISPUÈNE NOND) Sens des signifies d'une montre

fig. 04

~~ 100 ×~~

De ce fait, dans l'hémisphère Nord, l'air aspiré vers le centre d'une dépression est déporté sur sa droite; il ne l'atteint donc pas directement, mais bien via une trajectoire spiralée, en tournant autour de la dépression dans le sens anti-horlogique. Cet air en rotation emporte les structures nuageuses dans son mouvement leur conférant également la forme spiralée caractéristique observée sur les images satellites.

Pour un anticyclone, l'air s'éloigne du centre tout en étant également dévié vers la droite (toujours dans l'hémisphère Nord) et la circulation s'effectue dans le sens horlogique.

En ce qui concerne l'hémisphère Sud, les règles sont inversées, suite à la déviation vers la gauche provoquée par la force de Coriolis. Par conséquent, l'air circule dans le sens horlogique autour des dépressions et dans le sens anti-horlogique autour des anticyclones.

Ainsi, la force de Coriolis est à l'origine de la rotation de l'air autour des dépressions et des anticyclones. Elle explique l'enroulement des perturbations autour des dépressions ainsi que les vortex nuageux autour de l'œil des ouragans. Toutefois, la composante horizontale de la force de Coriolis s'annule à l'équateur (puisque le sens de rotation s'inverse, on peut logiquement en déduire qu'entre les deux hémisphères l'air ne doit pas tourner). C'est pourquoi les ouragans ne se forment pas directement dans la zone équatoriale mais de part et d'autre de celle-ci.

Il y a lieu de ne pas confondre les ouragans, qui sont de violentes tempêtes affectant les régions intertropicales avec les tornades qui sont quant à elles des tourbillons localisés de vent très puissant (elles se manifestent sous forme d'un tuba s'établissant sous la base d'un nuage) mais dont la dimension spatiale n'excède pas quelques centaines de mètres.

Dans le cas des tornades, la force de Coriolis intervient de manière beaucoup plus faible en raison de l'échelle réduite du phénomène, et le mouvement tourbillonnaire s'explique par d'autres facteurs dynamiques.

La même remarque peut d'ailleurs être émise au sujet du sens de rotation de l'eau qui se vide d'un évier. Contrairement à une idée reçue et assez répandue, il n'est pas nécessairement anti-horlogique dans l'hémisphère Nord et horlogique dans l'hémisphère Sud! En effet, les dimensions réduites d'un évier ne permettent pas à la force de Coriolis de se manifester de manière significative. Le sens de rotation de l'eau dépend en fait de la forme de l'évier, de la manière dont on le vide, de l'existence préalable de petits tourbillons au sein du fluide, etc.

En résumé, la force de Coriolis intervient plutôt dans les circulations à grande échelle telles que celles des dépressions et des anticyclones, comme expliqué cidessus, mais aussi des alizés, qui sont des vents réguliers soufflant de la ceinture de haute pression sub-tropicale vers l'équateur (zone de basse pression). Il y a donc

un mouvement de convergence vers l'équateur. Au Nord de l'équateur, le flux est dévié vers la droite et donne lieu des vents de Nord-Est (au lieu de Nord). Du côté Sud, il est dévié vers la gauche et donne lieu à des vents de Sud-Est (au lieu de Sud).

ET SI ON PRENAIT UN PEU DE HAUTEUR? CYCLONES ET ANTICYCLONES VUS DU CIEL

Nous savons que l'effet de Coriolis ne se manifeste que dans un repère en rotation, comme la Terre. Cet effet, particulièrement bien visible dans l'expérience du pendule de Foucault, permet également de comprendre l'origine des enroulements nuageux autour des cyclones.

Toutefois, un lecteur attentif pourrait s'interroger sur la réalité physique de ces enroulements nuageux : si ces structures sont liées à la rotation de la Terre, ne devraient-elles pas disparaître vues depuis un référentiel qui ne serait pas en rotation ? À quoi ressemblent finalement les cyclones vus depuis l'espace, depuis un référentiel non lié à la Terre en rotation ?

Les images satellites présentées dans les bulletins météorologiques montrent justement les fameux enroulements nuageux liés à l'effet Coriolis. Or, cet effet n'est-il pas sensé apparaître uniquement dans un référentiel en rotation ? Comment dès lors peut-on voir depuis l'espace ces fameux enroulements ? Les images spatiales ne devraient-elles pas montrer des nuages se déplaçant en ligne droite et non en spirale ?

Deux situations peuvent être envisagées :

- Le satellite qui a pris l'image est sur une orbite dite *géostationnaire*, c'est-à-dire que son mouvement de révolution autour de la Terre est synchronisé avec la rotation de notre planète: pour suivre l'évolution de la météo d'une région donnée du monde, le satellite doit en effet rester à la verticale de cette région, donc suivre la Terre dans son mouvement. Un tel satellite est donc attaché au référentiel qui suit la Terre dans sa rotation, il est donc normal de voir apparaître l'effet Coriolis sur ses clichés.
- Le cyclone est photographié par un satellite non géostationnaire (par exemple, un satellite qui gravite autour de la Terre sur une orbite polaire, ou une sonde interplanétaire survolant notre monde lors de ses pérégrinations dans le Système solaire).
 Peut-on comparer ce cas de figure avec celui du petit manège de Coriolis ? Un observateur extérieur au manège observait la balle se déplaçant en ligne droite...⁵⁴

⁵⁴ Cf. article Voir la Terre tourner, p18.

Si l'on assimile l'anticyclone au cavalier qui lance la balle et le cyclone au cavalier qui reçoit la balle, peut-on en dire alors qu'un observateur extérieur à la Terre verrait la parcelle d'air suivre un mouvement rectiligne ? Cette analogie atteint ici ses limites car, contrairement à la balle qui, une fois lancée, n'est en aucune façon influencée par la présence du second cavalier, la parcelle d'air, quant à elle, est réellement attirée par le cyclone ; elle subit donc, à chaque instant, une force réelle dont la direction est sans cesse changeante. La parcelle d'air sera alors bien observée comme se déplaçant suivant une trajectoire courbe.

Donc dans tous les cas, que le satellite soit géostationnaire ou non, les clichés de cyclones montrent des structures nuageuses en spirale.



fig. 05

Cyclone vu depuis un satellite non géostationnaire.

LE GRAND HÉRITAGE DES CHANOINESSES

AUTOUR DU PENDULE, LA COLLÉGIALE

MAXIME DUMÉNIL & FRANCESCO LO BUE (UMONS)

La collégiale Sainte-Waudru trône depuis cinq siècles sur la colline de Mons. Avec le beffroi, c'est l'un des monuments les plus emblématiques de la cité du Doudou. Grandiose, imposante, trapue diront certains. Si elle accueille régulièrement le pendule de Foucault de l'Université, elle est surtout célèbre pour abriter les reliques de sainte Waudru, ainsi que le célèbre Car d'Or, clés de voûte de la Procession, classée au patrimoine immatériel de l'UNESCO. Mais la collégiale, c'est bien plus encore.

Mons, collégiale, Waudru: trois mots étranges, prononcés en général machinalement, et qui peuvent pourtant révéler bien des secrets à ceux qui les écoutent...

Le mot *Mons* nous renvoie au latin, et signifie *mont*, *colline*. ⁵⁵ Effectivement, le paysage montois, outre ses innombrables terrils, compte quelques collines naturelles, comme le mont Panisel et la colline de Mons, qui surplombent la Vallée de la Haine.

C'est sur cette colline qu'a été bâtie la *collégiale*. Cette appellation renvoie à l'institution à l'origine de l'édifice, le *chapitre des chanoinesses*, dont les décisions se prenaient en collège. Une collégiale n'est pas une cathédrale qui, par définition, est l'église qui accueille la *cathèdre*, c'est-à-dire le trône de l'évêque. On ne trouve donc qu'une cathédrale par diocèse. En Hainaut, la cathédrale a été élevée à Tournai⁵⁶.

Mais si la collégiale Sainte-Waudru n'est pas une cathédrale, pourquoi ses commanditaires l'ont-ils voulu aussi grandiose ? La population montoise était-elle si nombreuse à l'époque que seule une église de 108 mètres de long était à même de l'accueillir ? Le personnage à laquelle est dédiée la collégiale, Sainte-Waudru, interpelle également. Pourquoi la collégiale porte-t-elle le nom d'une sainte a priori peu connue dans la Chrétienté ?

⁵⁵ L'appellation *Bergen*, dans la langue de Vondel, signifie également *collines*, mais au pluriel!

⁵⁶ La cathédrale Notre-Dame de Tournai a aussi accueilli le pendule de Foucault de l'UMONS en mars 2013.

Ces quelques questions montrent que la collégiale montoise n'est pas une église comme les autres. Ces premières impressions se retrouvent renforcées par une simple observation de l'édifice. Faites-en le tour, observez-là de bas en haut, franchissez-en le perron. Ce joyau architectural, dont la construction s'est étalée sur près de deux siècles et demi, est gothique de fond en comble, un véritable cas d'école, unique en Belgique.

Quels mystères recèle donc l'église sur la colline ?

IL ÉTAIT UNE FOIS

Nous sommes à Mons en 1450. Un chantier immense, pharaonique, s'ouvre sur la colline. Les bâtisseurs viennent de poser la première pierre d'une église grandiose. Pourtant, ce n'est pas une cathédrale qui verra le jour ici. Cette nouvelle église ne sera pas non plus destinée au peuple des fidèles. Non. C'est une église privée qui se construit. Une incroyable église privée, qui rivalisera par sa grandeur, sa beauté et son raffinement avec les plus belles cathédrales du moment.

Mais qui sont les commanditaires de cet édifice hors du commun ? Ils sont au nombre de trente, ou plutôt, **elles** sont au nombre de trente. En plein xv^e siècle, trente femmes – les chanoinesses – décident de s'offrir une « cathédrale » qui défiera le temps et les hommes.



fig. 01

La collégiale Sainte-Waudru et le beffroi sur la colline de Mons.

Les chanoinesses ont pensé à tout, ou presque. Aidées par les meilleurs architectes, s'inspirant des plus prestigieuses constructions de l'époque, elles conçoivent les plans de leur collégiale. Grâce à leur puissance et à leur créativité financière, leur rêve deviendra réalité.

Mais qui sont ces chanoinesses ? Comment peuvent-elles concentrer autant de pouvoir ?

À L'ORIGINE, UNE FEMME, WAUDRU

Comprendre l'origine du chapitre des chanoinesses conduit à se perdre dans les brumes du VII^e s. et de la naissance de la cité montoise.

Nous sommes à l'époque du célèbre roi Dagobert. On raconte qu'un couple d'origine noble, Waudru et Madelgaire, après avoir élevé ses quatre enfants, décide de consacrer sa vie à la prière. Madelgaire fonde une abbaye à l'origine de la ville de Soignies, et se fait appeler Vincent. Quant à Waudru, elle achète une colline loin des grands centres habités de l'époque, héritiers de l'époque gallo-romaine: Bavay, Maubeuge⁵⁷, Tournai. Elle s'y installe pour y former une communauté de religieuses qui se consacre à Dieu et aux pauvres. Elle est aidée par un personnage étonnant aux origines très controversées, un ermite nommé Ghislain, à l'origine de la ville de Saint-Ghislain.

La colline choisie par Waudru est un lieu stratégique et hospitalier. Surélevée, elle permet à ses habitants de vivre à l'abri des inondations tout en surveillant la vallée de la Haine. Le lieu permet également de s'abriter des vents dominants. De plus, fait rare, la colline est alimentée en eau par une source, la Seuwe.

Waudru commence par y faire construire un petit oratoire et quelques maisons. Un monastère se met en place. Il deviendra progressivement un lieu de référence tant au niveau religieux qu'économique et culturel, mais aussi un lieu de culture écrite. La ville de Mons est en train de naître. La présence et l'importance de cette institution n'a pas dû être étrangère à l'installation plus tardive, au x^e siècle, des comtes du Hainaut sur la colline.

Comme pour de nombreux saints de cette époque, peu d'éléments de la vie de Waudru sont connus. Les informations proviennent principalement de *textes hagiographiques*, c'est-à-dire des textes relatant la vie des saints, élaborés à partir de quelques éléments issus de la réalité, enrichis génération après génération d'éléments parfois fantaisistes, et qui finissent par se fondre dans l'imaginaire collectif.

⁵⁷ C'est à Maubeuge que la sœur de Waudru, Aldegonde, fondera un grand monastère.

Ainsi, six miracles sont attribués à Waudru, dont des guérisons, une libération de prisonnier, etc. Mais ce qui frappe dans la Vie de sainte Waudru, c'est que l'on y relate son parcours de vie, très humain. On y parle de ses doutes, de ses peurs, de ses moments de désespoir. Une chose est certaine : Waudru devait faire preuve d'un charisme rare.

On pense que Waudru meurt aux environs de l'an 688, probablement à l'âge de 60 ou 70 ans, à une époque où la plupart de femmes ne dépasse pas la quarantaine. C'est la ferveur populaire qui l'élèvera rapidement au rang de sainte. Elle ne sera officiellement canonisée que plus de trois siècles plus tard, en 1039.

Waudru est représentée sur quelques œuvres d'art – enluminures, tableaux, vitraux,... –, mais à chaque fois, c'est une facette différente de Waudru qui est mise en exergue : on la voit tour à tour fière abbesse, mère de famille, jolie princesse, bâtisseuse, femme totalement dévouée aux pauvres et aux malades, etc.

La communauté qui entourait Waudru évoluera pro-

gressivement du statut de communauté religieuse vers celui de chapitre noble. La transition reste malheureusement floue et pas très bien documentée. Les premières traces écrites relatant l'existence du chapitre de Waudru n'apparaissent officiellement qu'en 1123. On sait seulement qu'à la mort de Waudru, les religieuses s'organisent en suivant la règle de saint Benoît, et plus tard, celle moins contraignante de saint Augustin.

LES CHANOINESSES

Même si elles consacrent une bonne partie de leur vie à la prière, les chanoinesses ne sont pas des religieuses : elles n'ont pas prononcé les vœux de pauvreté, d'obéissance et de chasteté. Respectant la longue tradition de la communauté de Waudru, elles s'attellent à aider les pauvres.



Sainte Waudru et ses filles visitant une prison.
A. VAN YSENDIJK, 1850, Huile sur toile,
Collégiale Sainte-Waudru.

Elles sont surtout les propriétaires et les garantes des reliques de Waudru. Ces reliques confèrent du sens à leur existence, elles légitiment leur pouvoir politique et financier.

Ces reliques jouent également un rôle économique, puisqu'elles attirent dans la Cité bon nombre de pèlerins. On peine aujourd'hui à imaginer l'importance des reliques pour la société médiévale ou post-médiévale : dans un monde où la misère, les maladies et la mort sont omniprésentes, et pour lesquelles la science des hommes semble totalement impuissante, les saints sont les derniers remparts contre la désolation et le désespoir. Les saints sont les seuls intermédiaires entre Dieu et les hommes.



fig. 03

Médaillon sur lequel est représenté
une chanoinesse de Mons.

Le statut de chanoinesses a de quoi faire des jaloux : il garantit un cadre de vie privilégié, une éducation de qualité, etc. Mais ne devient pas chanoinesse qui veut. Les conditions d'accession au chapitre varient suivant les époques, mais présentent une constance : descendre en ligne directe de la noblesse européenne. Cette origine noble est même quantifiée en termes de *quartiers de noblesse*⁵⁸ : il en faut 8 au xIII° siècle et même 16 au xVIII° siècle !

Si cette condition est nécessaire, elle n'est pas encore suffisante : les grandes familles nobles jouent de leur influence pour qu'une de leurs filles fasse partie des trente élues et intègre ainsi dès son plus jeune âge le chapitre.

Un des aspects séduisant de ce statut tant prisé est qu'une chanoinesse conserve les biens liés à ses origines familiales. Mieux, sa fortune personnelle ne cesse d'augmenter, puisqu'une chanoinesse reçoit de l'argent du souverain – les *prébendes*; le chapitre recouvre quant à lui des taxes liées à ses nombreuses possessions réparties parfois bien loin de Mons. Leurs propriétés comptent de vastes domaines, parmi lesquels des champs, des forêts, etc. Pas moins de 3 000 hommes travaillent pour elles. Et, à partir de 25 ans, elles peuvent décider de se marier et de quitter le chapitre.

On entend par quartier de noblesse le nombre d'ascendants paternels et maternels nobles. Un enfant dont les quatre grands-parents (grands-pères et grands-mères) sont nobles compte donc 4 quartiers. Si tous ses arrières grands-parents sont nobles, il en compte 8.

Les chanoinesses ont le droit de mener une vie mondaine; elles participent ainsi à des fêtes parées de leurs plus beaux atours. Elles bénéficient des services de valets et de servantes. Si elles vivent isolées du reste de la ville par les murs de l'*encloître*, elles n'en demeurent pas pour autant recluses: elles peuvent voyager! Cette liberté leur confère une ouverture d'esprit remarquable, par exemple au niveau artistique.

L'influence des chanoinesses dans le monde du xv^e siècle est telle qu'elles parviennent à obtenir du souverain pontife qu'il pose un acte juridique fort, l'émission d'une *bulle papale*, qui les autorise à vendre des *indulgences* : elles peuvent ainsi réduire la durée de séjour au purgatoire des fidèles moyennant des espèces sonnantes et trébuchantes. Le pouvoir terrestre des chanoinesses semble sans limite. Il s'étend même au domaine des cieux.

LE CHANTIER

Au début du xv^c siècle, la colline de Mons accueille trois bâtiments majeurs. Le château comtal, dont les ruines sont encore visibles dans les jardins du Beffroi, la collégiale Saint-Germain utilisée pour les offices publics, et l'ancienne collégiale Sainte-Waudru, au cœur de l'encloître des Chanoinesses.

C'est cette collégiale romane – que les dames de Waudru qualifient *d'informe et grossière* – qui doit être remplacée par la nouvelle collégiale construite, elle aussi, au sein de l'encloître.

Que peut-on dire réellement du chantier du nouvel édifice ? Les chanoinesses tenaient heureusement des livres de compte. Leur étude permet de retracer partiellement l'histoire de la collégiale en examinant la succession des dépenses engagées. Par contre, tout fait ou décision non suivi d'une dépense tombe définitivement dans l'oubli.

C'est ainsi qu'on apprend la tenue en 1449 de réunions de préparation auxquelles participent les chanoinesses bien-sûr, mais aussi les officiels du chapitre, les représentants des différents corps de métiers, etc. Ces réunions portent sur l'établissement des devis du futur chantier. C'est probablement lors de ces réunions que sont dessinés des plans-patrons sur parchemin pour tenter de mieux définir le projet.

À ce stade, il n'est pas possible de savoir si les chanoinesses envisagent de reconstruire toute l'église, ou seulement le chœur et sa trésorerie.

On sait également que les chanoinesses demandent à cette époque qu'un rapport sur les plus beaux édifices de l'époque leur soit remis, réalisé par les meilleurs maîtres-

maçons. Les livres de compte relatent, entre autres, un déplacement à l'abbaye de Bonne-Espérance près de Binche, pour y observer son chœur gothique du XIII^e siècle.

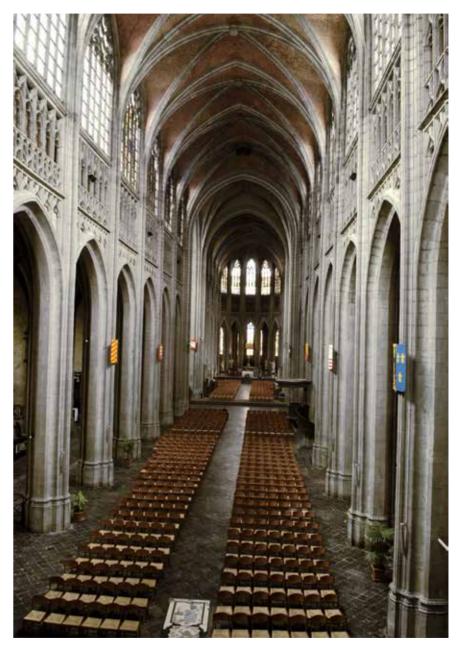


fig. 04

La nef de la collégiale, photographiée dans la direction du choeur.

Le voyage préparatoire le plus célèbre est celui de février 1450 qui conduit les différents corps de métier à Tournai, Lille, Grammont, Bruxelles, Louvain et Malines pour y observer les réalisations gothiques de l'époque. La construction gothique est, en effet, une tradition désormais déjà longue de plus de deux siècles dans nos régions.

On sait également que les premiers travaux de démolition et de terrassement débutent un mois plus tard, le 9 mars 1450. Deux chanoinesses se font accompagner quelques jours plus tard de deux enfants pour poser la première pierre.

Si on sait que la collégiale romane occupait déjà le plateau sur la colline, et qu'elle continue à être utilisée durant la construction de la nouvelle collégiale, il n'est pas possible de dire comment s'est articulée cette cohabitation, comment était orientée l'ancienne église, quelle surface elle occupait. Seule certitude, la démolition de l'église romane a été progressive.

Quant au chantier lui-même, il s'interrompt à la mauvaise saison. On retrouve dans l'iconographie de l'époque les techniques utilisées pour protéger la construction des intempéries : de la paille et de l'argile.

Quant aux pierres, elles proviennent notamment des carrières d'Écaussines et de Soignies. Deux types de pierre sont utilisés dans la collégiale : le grès et le prestigieux petit granit – la pierre bleue.

Le chœur de la collégiale est terminé en 1502. Ses dimensions spectaculaires et sa luminosité impressionnent. Ses chapelles latérales sont attribuées aux différentes corporations et aux confréries à condition de les meubler, de les pourvoir de verrières et de les entretenir.

En 1509, les chanoinesses font des démarches pour obtenir le placement de verrières peintes dans le chœur. Les cinq verrières de l'abside sont offertes par Maximilien de Habsbourg, les autres par des proches collaborateurs de l'empereur.

Mais la construction est encore loin d'être terminée, puisqu'après le chœur, c'est au tour du transept⁵⁹ d'être élevé. C'est probablement l'une des parties de l'édifice les plus spectaculaires. C'est elle qui établira la connexion avec la future nef. Quatre piliers immenses doivent soutenir la voûte la plus vaste de tout l'édifice!

C'est aussi par le transept que se feront les accès à l'église. Les chanoinesses et leurs invités entreront par le bras Sud, directement connecté à l'encloître, leur

lieu de vie. Toutes les autres personnes entrent dans l'église par le bras Nord. Cette entrée séparée est essentielle. Tout au long de l'année, à des moments spécifiques, certaines processions doivent pouvoir défiler dans la collégiale. De même, les confréries doivent pouvoir accéder aux chapelles qui leur sont attribuées. Le transept est terminé en 1519.

Le campanile⁶⁰ qui surmonte le transept et qui donne à la collégiale sa silhouette si caractéristique sera construit un peu plus tard, entre 1520 et 1521. C'est lui qui accueille les cloches de la collégiale, qui permettent d'appeler les fidèles.

Dès 1519, le chantier de la majestueuse nef est lancé. Les bâtisseurs commencent par construire les piliers et les murs. Ils recouvrent ensuite l'ensemble d'une charpente et d'une toiture. Les voûtes commencent à être construites au moment où les derniers piliers de la nef sortent de terre. L'ensemble n'est totalement voûté qu'en 1589. Les travaux de la nef ne prennent réellement fin qu'en 1681.

Si la décision de construire un tel édifice peut à juste titre interpeller par son caractère démesuré, son impact sur le développement de l'économie montoise est spectaculaire : le chantier donne du travail à des centaines de tailleurs de pierre, des ferronniers, des briquetiers, des verriers, des charpentiers, des couvreurs, etc.

COHÉRENCE ET RAFFINEMENT ARCHITECTURAUX

La construction de la collégiale se termine en pleine Renaissance. Pourtant, l'édifice est gothique de fond en comble ! Génération après génération, les chanoinesses ont perpétré d'une main de fer le souhait de voir les plans initiaux être respectés à la lettre... Seule concession au style renaissant : les sculptures commandées à Jacques Du Broeucq pour le jubé⁶¹. La collégiale Sainte-Waudru constitue donc aujourd'hui un fantastique laboratoire pour l'étude d'un art gothique arrivé à maturation, ayant bénéficié de trois siècles d'expérimentation diverses !

Qualifié ici de style brabançon, cette variante de l'art gothique très en vogue à l'époque à Louvain et dans les grandes villes de ce qui deviendra plus tard la Belgique, se démarque notamment par des arcs-boutants admirablement intégrés aux chapelles latérales, et une décoration extérieure tout à fait caractéristiques.

⁵⁹ Dans une église en forme de croix latine, comme la collégiale Sainte-Waudru, le transept est la partie de la construction qui correspond à l'axe transversal de la croix, entre le chœur et la nef.

⁶⁰ Le campanile actuel date de 1715. Il remplace celui de 1520 qui avait brûlé.

⁶¹ La collégiale a été dotée d'un jubé, c'est-à-dire d'une tribune haute qui portait les orgues et les chantres. Cette structure isolait physiquement le chœur de l'église du transept. Le chœur était dès lors une zone encore plus privilégiée, une église dans l'église. Ce jubé a été démantelé à la Révolution française.

Le niveau de raffinement de la collégiale est tel que les visiteurs qui y pénètrent ont l'impression d'une nef à la hauteur vertigineuse, impensable au seul examen extérieur de l'édifice. Pourtant, avec ses 25 mètres de haut, la nef de Sainte-Waudru n'est pas plus haute que celle de la nef romane de la cathédrale de Tournai qui ne procure à aucun moment cette sensation de vertige! L'habilité et la créativité des artisans qui ont œuvré à la collégiale ont permis un traitement de surfaces verticales extrêmement ingénieux. Par exemple, l'absence de chapiteaux au niveau des piliers de la nef permet de créer un *continuum* vertical qui confère à l'ensemble un irrésistible élan qui vous emporte vers le ciel.



fig. 05

L'absence de chapiteaux sur les colonnes confère à l'ensemble une spectaculaire impression de verticalité.

LA TOUR

Mais l'histoire de la collégiale ne s'arrête pas ici, car rien n'est trop beau pour la collégiale. Alors que le chantier de la nef bat son plein, les chanoinesses rêvent d'offrir à leur église la plus haute, la plus grandiose et la plus élégante des tours jamais imaginées par l'être humain.

PROSPECTION

En 1547, probablement en hiver, lors de la période de relâche du chantier montois, les chanoinesses mandatent un groupe d'experts à Louvain, Malines et Anvers pour y étudier les ambitieux chantiers en cours : des tours majestueuses y sont en construction, et il faut ramener à Mons une copie des plans.

À Louvain, l'église Saint-Pierre doit être couronnée d'une tour centrale haute de 168 mètres, flanquée de deux tours plus petites sensées culminer tout de même à 136 mètres. Le chantier de la grande tour commence en 1507, mais est abandonné en 1541, probablement par manque de moyens financiers et suite à des problèmes de stabilité du sol.

À Anvers, les bâtisseurs se sont lancés dans la construction de deux tours pour la cathédrale Notre-Dame. Seule la tour Nord sera finalement achevée, en 1518. Elle culmine encore aujourd'hui à 123 mètres de haut.

À Malines, la tour Saint-Rombaut doit atteindre 162 mètres de haut. Sa construction commence en 1452, mais le chantier s'arrête définitivement en 1520 à une hauteur respectable de 97 mètres.

Mais les chanoinesses ne veulent pas cloner à l'identique une de ces tours. Elles veulent frapper les esprits, leur tour doit se rapprocher plus encore du ciel : avec ses 189 mètres de haut, la tour de la collégiale Sainte-Waudru doit être la plus haute construction du continent, et probablement du monde!

S'ÉLEVER VERS LE CIEL

Le chantier de la tour commence réellement en 1548 et se poursuit jusqu'en 1570. Mais la situation politique se dégrade progressivement. Les chanoinesses doivent faire des concessions à leurs fermiers dont les terres sont ravagées par les troupes. Leurs ressources financières se tarissent. L'interruption du chantier va durer près d'un demi-siècle.

Le chantier repart en 1619, et se poursuit sans discontinuer jusqu'en 1637 : de nouveaux problèmes financiers



Le plan de la tour conservée aux Archives de l'État à Mons.

conduisent cependant les ouvriers à déserter le chantier jusqu'en 1659. Ils reviennent ensuite travailler quelques années, mais cette fois, uniquement pour recouvrir définitivement l'embryon de tour d'un toit en ardoises. La tour ne dépassera donc jamais la hauteur de la nef. L'intérieur sera voûté un an plus tard. La construction de la collégiale s'arrête ainsi... Il est déjà temps de penser aux restaurations!

RELATIONS HOULEUSES

Une anecdote assez extraordinaire illustre à la fois le caractère bien trempé des Chanoinesses, et les conséquences démesurées qu'une décision précipitée peut avoir sur le cours de l'histoire.

Ainsi, lorsqu'en 1661, la tour à l'horloge de la ville de Mons s'effondre, les autorités communales, en recherche d'une solution de remplacement, proposent aux chanoinesses de prendre en charge le coût de la construction de leur tour, à la seule condition que celle-ci puisse accueillir trois cloches municipales. À cette époque en effet, on se servait des cloches pour alerter la population en cas d'incendie, pour sonner la fin de la journée de travail, etc. La réaction des chanoinesses ne se fait pas attendre, cinglante : il est impensable que des cloches municipales soient installées dans leur tour ! Cette malheureuse histoire de cloches a probablement sonné le glas de la tour qui devait toucher le ciel.

À Mons, la tour est même devenu proverbiale : c'est comme la tour de Sainte-Waudru, on n'en verra jamais le bout !

LA TOUR AU XXI^e SIÈCLE

Peu de montois en ont conscience, mais l'embryon de tour est toujours bien visible aujourd'hui. Observez la partie de la collégiale orientée vers la gare. Un simple coup d'œil à la géométrie très travaillée des murs de cette partie de l'édifice montre que l'on a affaire à une toute autre structure que celle du corps de l'église proprement dit. Le porche constitue donc l'entrée de la tour et non celle de la collégiale en tant que telle. Si l'on compare le début de la tour de la collégiale avec les tours des cathédrales de Malines et d'Anvers, on est saisi par la ressemblance.

Lorsqu'on se trouve à l'intérieur de la collégiale, au pied de la tour inachevée, le dimensionnement des structures montre que les bâtisseurs avaient bien prévu de monter haut, très haut !

RÉFLEXIONS

Mais à quoi devait finalement ressembler cette tour si elle avait été achevée ?

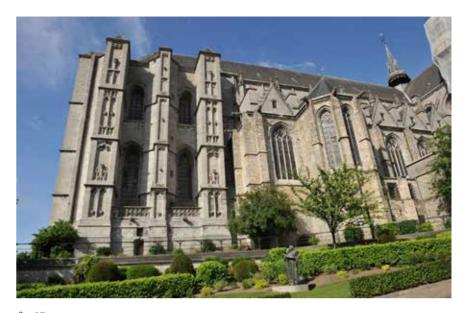


fig. 07

La tour inachevée de la collégiale est visible sur la gauche de l'édifice : les imposants contreforts trahissent l'ambition initiale des bâtisseurs.

Les archives de l'état conservent encore aujourd'hui à Mons un plan long de plus de trois mètres, et large d'une cinquantaine de centimètres, d'une tour prodigieuse à l'élégance et au raffinement décoratif rare. Ce plan a fait l'objet de nombreuses polémiques. S'agit-il de l'un des trois plans ramenés à Mons en 1547, ou du plan de la tour que les bâtisseurs avaient proposé aux chanoinesses pour leur collégiale ?

Une observation attentive du document montre une remarquable similitude avec la tour non achevée de Malines... mais aussi avec la partie construite de la tour de Sainte-Waudru.

Ce plan est impressionnant à plus d'un titre. Il n'agit pas d'une simple esquisse. Ses auteurs ont voulu montrer réellement à quoi allait ressembler la tour, avec un niveau détail tout à fait spectaculaire. Ce plan a été imaginé pour séduire les chanoinesses, ou plus probablement, les commanditaires de la tour de Saint-Rombaut, qui n'étaient pas forcément habitués à décrypter ce type de plan à deux dimensions. Dès lors, ses auteurs lui ont conféré une légère perspective au niveau du porche et du sommet. Il n'en demeure pas moins que seuls des experts sont à même de le déchiffrer réellement.

Cependant, beaucoup se demandent si une tour aussi vertigineuse pouvait être techniquement viable. N'était-elle finalement pas trop haute, trop lourde, trop ambitieuse?

~~ 116 ×~

Il semble que non. Certes, il est probable que les chanoinesses auraient peut-être en cours de route revu un peu à la baisse leurs prétentions : plus un chantier est élevé, plus il est complexe et cher, et plus le personnel technique perd en efficacité. Mais a priori, d'un point de vue purement structurel, la tour aurait probablement pu être réalisée.

Imaginez l'aspect de la collégiale et de la colline de Mons si le projet fou des chanoinesses avait pu être finalisé... Vertige assuré.

LA FIN D'UNE ÉPOQUE

En 1794, à l'époque où Mons fait partie du département français de Jemappes, les révolutionnaires votent la suppression du chapitre de Sainte-Waudru.

«L'assemblée considérant qu'aux termes de l'article premier du décret du 15 décembre dernier, la noblesse est supprimée, qu'il n'y a plus parmi les hommes de distinction, qu'en conséquence tout chapitre noble ou privilégié ne peut plus exister chez un peuple qui a admis la liberté et l'égalité; que d'après la proclamation annexée au décret, toute corporation sacerdotale est abolie, que par suite de disposition de cette loi, le chapitre de S.te-Waudru est supprimé; considérant également que l'église de S.te-Waudru, par sa situation et sa construction, est plus salubre et plus vaste que celle de Saint-Germain,... L'assemblée arrête que le chapitre de Sainte-Waudru et celui de Saint-Germain ainsi que son église sont et demeurent supprimés; ... »



fig. 08Square Saint-Germain.

La dernière assemblée du chapitre a lieu le 27 juin 1794. Deux semaines plus tôt, les chanoinesses sentant le vent tourner éloignent de Mons les reliques de Sainte-Waudru pour les mettre en sureté. Les dames du chapitre quittent alors définitivement la ville.

La démolition de la collégiale Saint-Germain en 1799 a comme conséquence l'apparition d'une dépression sur la colline, le square Saint-Germain, bien connu des montois, situé entre la collégiale Sainte-Waudru et le piétonnier. Difficile d'imaginer aujourd'hui que deux collégiales étaient construites à quelques mètres l'une de l'autre!

En 1802, la collégiale devient une église paroissiale mais il faut attendre le 12 juin 1803 pour que quatre chanoinesses autorisent le retour des reliques dans la cité de Waudru. La dernière chanoinesse s'éteint à Liège un demi-siècle plus tard, en 1866.

LE TRÉSOR DE LA COLLÉGIALE

Aujourd'hui, lorsque l'on parle du trésor de la collégiale, on pense aux merveilleux objets liturgiques – calices, livres d'heures, ostensoirs, chasubles, etc. – que l'on peut admirer dans la salle du Trésor.

Pour les chanoinesses, la plupart de ces objets ne constituent finalement qu'un moyen de stocker une partie de leurs ressources financières : en cas de besoin, ces objets précieux sont fondus pour récupérer des liquidités. Pour les chanoinesses, leur véritable trésor, ce sont les reliques de Sainte-Waudru. La collégiale en est l'écrin; les reliques, le joyau.

Les reliques⁶² sont conservées en deux parties : le corps de la sainte se trouve dans la châsse qui surplombe le chœur de la collégiale; et sa tête, dans un reliquaire spécifique, le Chef, exposé dans une des chapelles latérales. Cette séparation des reliques ayant eu lieu en 1250 pour en faciliter l'accès aux fidèles. La châsse et le reliquaire actuels du Chef datent du xixe siècle.

⁶² Dans l'esprit des montois, la châsse est indissociable du célèbre Car d'Or. Ce chariot baroque que l'on trouve à l'arrière de la nef sert effectivement à transporter la châsse durant la Procession. S'il est considéré aujourd'hui comme une œuvre d'art, pour les chanoinesses, il s'agissait surtout d'un char purement fonctionnel, mais assigné au transport des reliques de Waudru: il devait donc être très beau. Les comptes permettent de comprendre qu'il était souvent réparé ou amélioré, et remplacé si nécessaire. En cinq siècles, seuls quatre chars ont été utilisés, ce qui montre à quel point ils ont été choyés. Pour les construire, les chanoinesses n'hésitaient pas, ici aussi, à faire appel aux meilleurs charpentiers, charrons, sculpteurs, orfèvres et peintres: ces chars leur coûtaient donc fort chers. Ils étaient tirés par les meilleurs cheveux, prêtés par les comtes du Hainaut ou les familles nobles. Ces différentes générations de chars n'ont jamais eu leur place dans la collégiale. Ce n'est en fait que très récemment que le Car d'Or a été installé provisoirement dans la nef gothique, et que finalement, il y a élu domicile.

En 1997, la châsse a été ouverte afin de permettre à l'évêque de Tournai d'en faire une nouvelle reconnaissance. Cette ouverture a eu lieu en présence des autorités de la Ville, de la Province, du clergé et un médecin légiste. On y a trouvé des ossements qui *a priori* peuvent être datés⁶³ du VII^e siècle. Ils correspondent au squelette quasi complet d'une femme, très grande pour l'époque, qui mesurait entre 1,62 m et 1,69 m. Ils étaient contenus dans un sac en cuir datant du XIII^e siècle et enrobés dans un linceul en soie. Deux linceuls antérieurs étaient également conservés dans la châsse dont un d'origine byzantine datant de la fin du VIII^e siècle ou du début du IX^e siècle. Ce fait n'est pas anecdotique : il montre à quel point ces reliques ont depuis toujours revêtus une importance considérable, puisqu'on n'hésitait pas à utiliser des tissus très précieux pour leur rendre honneur.

LE GRAND HÉRITAGE

En ce xxı° siècle, l'écho des chanoinesses continue à résonner dans la collégiale. Si le chapitre a disparu depuis plus de deux siècles, la puissance, le goût et la force de caractère des dames de Waudru ne cesse de nous éblouir. Et si vous lisez ces quelques lignes, c'est que vous avez pu apprécier la grandeur de l'héritage qu'elles nous ont légué : la collégiale.

Vous avez même pu y voir tourner la Terre.



fig. 09Collégiale, nef.

DANS LES COULISSES DU PENDULE DE WAUDRU...

FRANCESCO LO BUE (UMONS)

Voir osciller un pendule de Foucault constitue toujours une expérience hors du commun. Assister à la naissance d'un pendule de Foucault en est une autre, encore plus rare.

À L'ORIGINE...

Tout a commencé en 2004. Les physiciens de l'Université se réunissent pour définir le programme de 2005, *Année internationale de la Physique*. Les propositions d'activités fusent de toute part. Cependant, une idée, émise par deux jeunes chercheurs, sort immédiatement du lot : pourquoi ne pas reproduire à Mons la célèbre expérience du pendule de Foucault ?

Cette idée brillante, mais folle, fait l'unanimité au sein des physiciens. Aucun d'entre eux n'a d'ailleurs jamais entendu parler d'une précédente tentative montoise 64 . Quant au lieu, il faut trouver un édifice suffisamment haut, où le plafond culmine à au moins dix mètres, voire idéalement à vingt mètres de haut. Et à expérience exceptionnelle, écrin exceptionnel : tous les regards convergent alors vers la magnifique collégiale Sainte-Waudru, chef d'œuvre du gothique brabançon, dont la construction a commencé au xve siècle par la volonté des chanoinesses.

À cet instant, j'oscille – sans mauvais jeu de mots – entre un intense enthousiasme et un scepticisme prudent : la Fabrique d'Église sera-t-elle d'accord ? Serons-nous capables de résoudre les légendaires difficultés techniques associées au pendule ? N'est-il pas risqué d'inviter les écoles à venir voir tourner la Terre, sans être sûr que l'expérience fonctionnera ? Que faire si nous échouons ?

──≈ 120 ∽

—>≈ 121 ×∽=

⁶³ Grâce à la technique utilisant la décroissance radioactive du carbone 14.

⁶⁴ En réalité, deux pendules de Foucault avaient déjà oscillé à Mons, mais en 1851!

UN BINÔME DE CHOC

Première étape, trouver des techniciens compétents motivés, capables de créer le pendule rêvé par les physiciens. Très rapidement, Jean-Pierre Toubeau et Jean Minez répondent présents. Le premier travaille en Faculté de Médecine et de Pharmacie dans le service du Prof. Pierre Gillis, et le second en Faculté des Sciences, dans le service du Prof. Philippe Herquet.

Toutefois, avant de se lancer dans la grande aventure, il faut s'assurer que les autorités gérant la collégiale acceptent de la transformer, l'espace de deux semaines, en laboratoire de Physique! Les contacts pris avec la Fabrique d'Église se révèlent positifs: le projet suscite l'enthousiasme à tous les niveaux; nous recevons rapidement le feu vert pour lancer l'expérimentation. Nous allons pouvoir vérifier que notre monde tourne toujours dans le bon sens. La partie est loin d'être gagnée, car nous savons tous que la réalisation d'un pendule est délicate, et qu'il ne suffit pas de suspendre une boule à un fil! Essayez chez vous!

PREMIÈRES INVESTIGATIONS

Après l'inévitable recherche d'informations sur Internet, nous partons à la rencontre de l'une des rares personnes en Belgique ayant déjà réalisé un pendule de Foucault. André Lausberg, astrophysicien liégeois, installe en effet un pendule tous les quatre ans dans l'église Saint-André. Mais nos techniciens décident d'aller plus loin, et d'inventer leur propre système. Mais avant cela, une visite de reconnaissance à la collégiale s'impose.

Dès notre entrée dans la nef, nous sommes frappés par la présence de trous disposés régulièrement le long de la voûte – nous apprendrons plus tard que ces ouvertures servaient probablement pour suspendre des chandeliers. Ces ouvertures semblent prédestinées! Nous devons impérativement monter dans les combles. Y accéder est loin d'être une promenade de santé: escaliers en colimaçon vertigineux, triforium des plus étroits... Et puis, le choc visuel, nous découvrons enfin les entrailles de l'édifice: l'impressionnante charpente, suspendue entre ciel et terre, avec sous nos pieds, l'imposante voûte, et au-dessus le toit. Nous retrouvons les ouvertures dans le plafond – huit centimètres de diamètre – qui traversent la voûte, épaisse d'un peu moins de quarante centimètres.

AU TRAVERS DE LA VOÛTE

De retour à l'Université, les techniciens commencent à plancher sur le dispositif de suspension. L'idée est donc de le fixer à la charpente – sans y forer le moindre trou, sous peine de se faire taper sur les doigts par la commission des bâtiments et sites!

Jean-Pierre et Jean imaginent alors une structure composée de deux poutres horizontales, longues de trois mètres, qui sandwichent, à environ 1,60 mètre 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, vient épouser la voûte précisément à l'endroit où se trouve l'ouverture circulaire. Évidemment, monter les planches dans les combles n'est pas de tout repos!

L'autre pièce maîtresse du dispositif est celle qui permet de connecter le câble du pendule à la structure en U, et qui a l'aspect... d'un T! En effet, un cylindre métallique est glissé, via la base percée du U, à l'intérieur de la voûte. Ce cylindre est solidement arrimé à la base du U par l'intermédiaire d'une plaque métallique horizontale. Un fin canal, à peine plus large que le câble lui-même, a été creusé dans l'axe principal du cylindre. Ce canal permet de confiner le câble, lui évitant par exemple de toucher la voûte, tout en lui permettant de se mouvoir librement et sans contrainte aucune dans toutes les directions. Afin de pas abimer le fil lors de ses innombrables allers-retours, le bord inférieur du canal a quant à lui été évasé. Mais rien n'est simple, car le conduit au travers de la voûte n'a que huit centimètres de diamètre et est loin d'être parfaitement vertical! C'est aussi grâce à cette pièce en T que la longueur du fil peut être délicatement ajustée lors de la mise sous tension: en effet, le câble s'allonge de près de trente centimètres lorsqu'il supporte la sphère métallique!

Le choix même du fil n'est pas trivial : faut-il absolument utiliser un câble monobrin comme le recommandent beaucoup de personnes sur Internet ? Ou un câble torsadé peut-il aussi faire l'affaire ? La discussion avec les amis liégeois et la nécessité d'assurer une sécurité maximale lors de l'expérience, poussent les techniciens montois à opter pour la solution du fil torsadé. Le modèle retenu est composé d'acier galvanisé, de deux millimètres de diamètre, capable de soutenir 225 kg avant de se rompre... de quoi voir venir!

Quant à l'autre extrémité du câble, elle traverse une grosse vis au-delà de laquelle elle est bloquée par un nœud soudé ; le tout est vissé ensuite sur le sommet de la sphère. Chaque partie du dispositif est testée dans un des laboratoires de Physique de l'Université.

Afin de ne pas perturber l'organisation du culte, nous décidons de nous installer à l'arrière de la nef, non loin du prestigieux Car d'Or.

PREMIÈRES OSCILLATIONS

Les premiers tests in situ se révèlent immédiatement concluants, confortant les remarquables intuitions et solutions envisagées par nos deux techniciens ; et c'est là l'un des aspects les plus impressionnants de cette aventure.

Les tests montrent clairement une dérive régulière 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, soit un tour toutes les 31 heures (Mons n'est pas au pôle, le plan du pendule ne tourne donc pas en 24 h).

Mieux, notre pendule se paie même le luxe d'être soumis à un amortissement moindre que celui du Panthéon... En effet, au fur et à mesure de ses oscillations, à cause des différents frottements, le balancier se déplace de moins en moins loin : on dit que le mouvement du pendule s'amortit. Cet amortissement reste toutefois relativement faible, puisque après une heure d'oscillations, l'amplitude du mouvement n'est réduite que de moitié!

Le pari semble donc sur le point d'être gagné. Et il le sera. L'engouement du public et des médias est assez exceptionnel. Plus de 3 500 visiteurs en à peine deux semaines, et un retour médiatique à faire pâlir de jalousie bien des attachés de presse!

En 2011, la collaboration avec les graphistes montois d'Ex Nihilo débouche sur la réalisation d'un nouveau plateau en bois, à la très élégante rose des vents... Petit hommage à Léon Foucault : nous faisons graver sur le disque l'invitation historique du physicien à venir voir tourner la Terre ! Plus de 5 500 visiteurs viennent assister aux 70 visites guidées, animées par les physiciens de l'Université. L'enthousiasme est toujours aussi spectaculaire. Cette fois l'événement dure un mois.

Le succès est tel que l'on nous propose d'installer le pendule dans l'un des bâtiments les plus imposants de l'Occident : la cathédrale Notre-Dame de Tournai ! C'est le début d'une autre aventure, qui aura lieu en 2013...

Et nous voilà en 2015 de retour dans la collégiale, dix ans après nos premières expérimentations, au moment où Mons est capitale culturelle de l'Europe!

LE SECRET DU PENDULE

Si je vous ai dévoilé ici quelques-uns des secrets du Pendule de Sainte-Waudru, la lumière n'a pas encore été faite sur l'un de ses plus grands mystères : mais où donc nos deux techniciens cachotiers ont-ils déniché la sphère du pendule ? Une sphère de 42 kilos en acier, parfaitement lisse, d'un diamètre de 22 centimètres, ça ne court pas les rues ! Dix ans après ses premières oscillations, le pendule de l'Université garde encore une part de mystère, pour notre plus grand plaisir...



fig. 01

Jean-Pierre Toubeau perce la sphère (42,5 kg pour un diamètre de 22 cm) pour y placer le système de fixation du fil.



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. 05

Jean-Pierre Toubeau amène l'une des deux poutrelles dans les combles. On le voit ici se déplacer, sécurisé par un harnais, sur l'une des corniches de la collégiale.



fig. 02

Pour une sécurité maximale, le fil retenu pour le pendule de Sainte-Waudru est un câble d'acier torsadé de 2 mm de diamètre.



fig. 04

En bas de l'image, on distingue le trou dans la voûte qui a été retenu pour l'expérience. Au centre, une des grosses poutres horizontales de la charpente, sur laquelle on voit l'une des deux poutrelles verticales qui a servi à fixer le système d'attache.



fig. 06

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.

—≈ 124 ×~



fig. 07

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.



fig. 09

La pièce métallique en T qui traverse la voûte est maintenant en position à la base du U.



fig. 08

L'un des éléments-clés de la suspension du pendule est ce « T » métallique. On distingue audessus la pièce qui permet d'ajuster finement la longueur du fil.



fig. 10

Une fois le fil passé au travers de la voûte, il faut l'attacher solidement à la boule. Le fil traverse une grosse vis et se termine par un nœud soudé. Cet ensemble est ensuite vissé au sommet de la sphère.







fig. 11

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 ».



fig. 12

L'amortissement du mouvement du pendule montois est plus faible que celui du Panthéon à Paris. Après une heure, il n'a perdu que la moitié de son amplitude initiale.

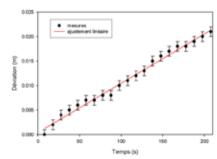


fig. 13

Les mesures de la déviation du plan d'oscillation du pendule de Sainte-Waudru sont en parfait accord avec les prévisions théoriques pour la latitude de Mons : il faut plus de 31 h pour que ce plan boucle un tour complet.

—≈ 126 ×≈—

ET SI LA TERRE TOURNAIT PLUS VITE ?

CLAUDE SEMAY (UMONS)

Que se passerait-il donc? Je vous laisse découvrir sur la planche en fin d'article quels phénomènes plus ou moins agréables nous subirions si notre planète se mettait à tourner 17 fois plus rapidement qu'actuellement.

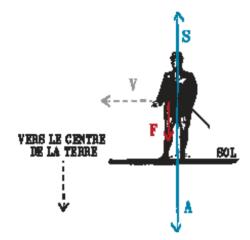


fig. 01

Essayons de comprendre les raisons de l'état d'apesanteur décrit dans cette planche. Partons de la situation réelle en supposant que vous vous trouvez sur l'équateur terrestre. Une personne vous observant depuis l'espace (et ne tournant pas avec la Terre) constate que vous effectuez un mouvement de rotation autour du centre la Terre à la vitesse v de 1 670 km/h (une circonférence terrestre parcourue en 24h). Il en déduit que vous êtes soumis à une force centripète (dirigée vers le centre de rotation) de grandeur $F = mv^2/R$, où m est votre masse et où R est le rayon terrestre. Cette force est en fait la résultante de deux autres forces. La première est la force d'attraction, de grandeur $A = GmM/R^2$, qui vous tire vers le centre de la Terre, où G la constante de gravitation et M la masse de la Terre. La deuxième est la réaction du sol orientée vers le haut, de grandeur S, qui vous empêche de vous enfoncer dans le sol. Ces forces ayant la même direction à l'équateur, elles se contrebalancent partiellement. On a

alors la relation suivante entre les grandeurs : F = A - S. Si le sol réagit, c'est que vous exercez une force sur lui ; et cette force, c'est en fait votre poids, de grandeur P = S, donné par la relation $P = A - F = G\frac{mM}{R^2} - m\frac{v^2}{R}$. Signalons que les quantités P et A sont pratiquement

égales puisque F est environ 300 fois plus faible que A. Si la Terre se mettait à tourner plus vite, vous constateriez que votre poids *P* diminue pour finalement s'annuler à la valeur

critique de la vitesse (indépendante de votre masse m) $v_c = \sqrt{\frac{GM}{R}}$, c'est-à-dire 28 500 km/h, environ 17 fois la valeur réelle. Dans ce cas, vous vous retrouveriez, au niveau du sol, dans les mêmes conditions qu'un astronaute en chute libre dans un véhicule spatial en orbite autour de la Terre, et vous seriez en état d'apesanteur. Notons que pour échapper définitivement à l'attraction de la Terre, il vous faudrait acquérir une vitesse supplémentaire de 11 800 km/h, pour atteindre la vitesse de libération, c'est-à-dire 40 300 km/h.

Pour être précis, une orbite circulaire de rayon R fixé ne peut être parcourue qu'à une vitesse ν_c déterminée, donnée par la formule ci-dessus. Supposons donc que la Terre soit animée de la vitesse folle de 28 500 km/h au niveau de l'équateur. En cet endroit, prenons un objet en orbite circulaire au niveau du sol et élevons-le de 1 m. Une fois lâché, l'objet se mettra à parcourir une orbite elliptique. Les calculs montrent que, du point de vue d'un observateur au sol, l'objet va flotter en oscillant entre une altitude de 1 et 7 m, une oscillation complète étant réalisée par tour de Terre. Ce tour sera parcouru en 5 millisecondes de plus que l'observateur. Pour ce dernier, l'objet va donc très lentement reculer.

Ces phénomènes impliquent que des tensions vont se développer dans un solide non-ponctuel, étendu dans la direction verticale. Ces tensions vont contrecarrer la tendance naturelle des différentes parties du solide situées à des altitudes différentes d'orbiter sur des trajectoires différentes. Un être humain pourrait sans doute facilement supporter ces contraintes et garderait sans difficulté son intégrité physique. Il en irait tout autrement pour de grandes masses liquides, comme les océans par exemple.

Pour les amateurs de physique hors-norme, signalons que, dans un futur très lointain, l'humanité sera peut-être en mesure de construire ce que l'on appelle une sphère de Dyson 65, c'est-à-dire une gigantesque structure enveloppant complètement le Soleil pour collecter la totalité de l'énergie rayonnée par celui-ci. Une énorme quantité de matière serait nécessaire pour sa construction. Celle-ci pourrait être obtenue par le démantèlement d'une petite planète dont on aurait accéléré la rotation sur elle-même pour en éjecter facilement des matériaux vers l'espace 66.

~~ 129 ×~

⁶⁵ Claude Semay, À la recherche des civilisations extra-terrestres, in La petite collection de Galactée, Cercle d'Astronomie Olympus Mons, UMONS.

⁶⁶ Freeman J. Dyson, The Search for Extraterrestrial Technology, in Perspectives in Modern Physics: Essays in Honor of Hans Bethe, R. E. Marshak édit., Interscience Publishers, John Wiley & Sons, 1966, p 641-655.

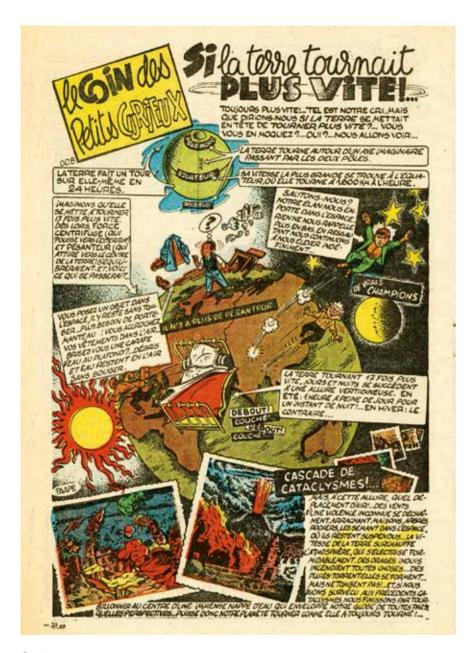


fig. 02

Planche due à Eddy Paape, extraite du magazine Spirou n° 759 (© Dupuis, 1952).

Cet article n'aurait sans doute pas été écrit sans la planche d'Eddy Paape. Je tiens à remercier la Fondation Eddy Paape et les Éditions Dupuis pour l'autorisation d'utilisation, ainsi que M. J. C. De la Royère du Centre Belge de la Bande Dessinée pour la fourniture d'une copie de qualité. Merci également à MM. Bernard Coulange et Michel Schelkens dont les informations m'ont permis de retrouver la planche.

ET SI LA TERRE CESSAIT DE TOURNER?

FRANCESCO LO BUE (UMONS)

Et si la Terre cessait de tourner ? Quelle étrange question... Toute notre vie est organisée autour de la notion de journée : c'est la rotation de la Terre sur elle-même qui rythme notre quotidien. Pourtant, notamment à cause de la Lune, la rotation de la Terre ralentit : la durée du jour augmente de un à deux millièmes de seconde par siècle. Pas de quoi révolutionner nos agendas, certes ; à ce rythme, plusieurs milliards d'années seront nécessaires pour que la Terre cesse de tourner. La question n'est donc a priori pas à l'ordre du jour.

Mais que se passerait-il si les choses se précipitaient, et si subitement, pour une raison ou une autre, notre monde cessait de tourner ? Évènement peu probable, mais qui a donné envie à Witold Fraczek, un géographe de l'ESRI 67 de se pencher sur la question.

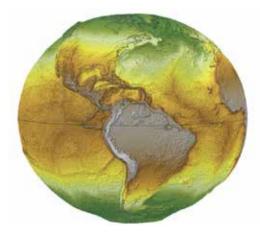


fig. 01

La gravité n'est pas uniforme à la surface de la Terre. En vert, les zones de plus forte gravité, et en brun, celles où l'attraction est la plus faible. En cas de disparition de la force centrifuge, l'eau du bourrelet équatorial se dirigerait vers les zones de plus forte gravité (document W. Fraczek, ESRI).

--> 131 ⊮~--

⁶⁷ ESRI : Environmental Systems Research Institute, société américaine spécialisée dans le développement de logiciels géographiques.

Contrairement à une idée répandue, nous ne nous retrouverions pas en apesanteur : le fait d'être constamment attiré vers le sol n'est bien entendu en rien lié à la rotation de notre monde. Un arrêt rapide de la rotation de la Terre ⁶⁸ en quelques dizaines d'années aurait certainement des conséquences très complexes au niveau climatique par exemple : comment pourrait-il en être autrement avec la durée du jour qui passerait de 24 h à un an ?

W. Fraczek s'est quant à lui limité à simuler l'effet de la variation d'un seul paramètre... et les résultats sont déjà étonnants! Il s'est penché sur la disparition de la « force centrifuge »⁶⁹. Cette force, dirigée vers l'extérieur de la Terre, diminue en effet légèrement le poids apparent des objets à la surface de la planète, d'autant plus fortement que l'on se rapproche de l'équateur.

Cet effet a même contribué à déformer lentement notre planète tout au long de son histoire. La Terre s'est aplatie au niveau de ses pôles ⁷⁰. Ainsi, une personne située au pôle (Nord ou Sud) est 21 kilomètres plus proche du centre de la Terre qu'une autre à l'équateur. Conséquence immédiate : elle pèse un peu plus aux pôles qu'à l'équateur ! La force centrifuge diminue également directement le poids mesuré à l'équateur. Or, les océans sont aussi affectés par la force centrifuge : la Terre est en effet ceinturée par un *bourrelet équatorial* océanique, qui tend à renforcer la forme aplatie de la Terre. Si la Terre s'arrêtait subitement de tourner, sa forme ne pourrait instantanément se modifier pour retourner à la sphère. Les différences réelles entre les attractions aux pôles et à l'équateur subsisteraient.

Toutefois, si la Terre ne tournait plus, la force centrifuge disparaitrait, et avec elle le bourrelet équatorial. Nos mappemondes, ainsi que toute l'organisation de la vie sur Terre, en seraient profondément modifiées!

Concrètement, si la force centrifuge disparaissait progressivement, disons en quelques décennies, l'eau du bourrelet équatorial se déplacerait principalement vers les zones de gravité plus fortes, les pôles. Les simulations de W. Fraczek montrent que cette redistribution océanique ferait apparaître de nouvelles terres dans la région équatoriale, celles des abysses d'aujourd'hui. À l'inverse, cette migration de l'eau équatoriale engloutirait de nombreuses régions, nordiques principalement. La très grande majorité de l'Europe disparaitrait sous les flots! Seules ses chaînes de montagnes seraient encore émergées, formant de nouvelles îles. C'est tout le tourisme balnéaire qui devrait se réorganiser...

Peu à peu, un énorme continent équatorial ferait son apparition, ceinturant totalement la planète. Conséquence immédiate : l'eau se répartirait, de manière non homogène, de part et d'autre, pour former deux gigantesques océans totalement disjoints. Contrairement à la situation actuelle où le niveau d'eau est essentiellement identique pour les trois océans, puisque connectés entre eux, il en irait tout autrement avec ces deux océans potentiels. Les simulations montrent en effet que la surface de l'océan austral serait 1 400 m plus basse que celle de son homologue boréal!

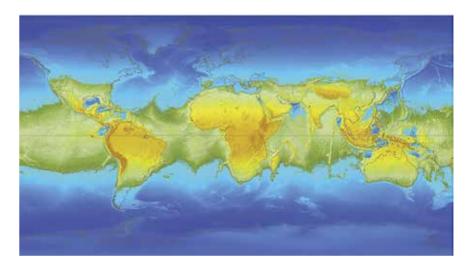


fig. 02

Si, en quelques décennies, la Terre cessait de tourner, un gigantesque continent équatorial ferait son apparition, de même que deux océans totalement disjoints (carte réalisée par W. Fraczek, ESRI).

Quid des conséquences de cette nouvelle géographie sur les équilibres écologiques, la biodiversité et l'organisation de la société ? Nul ne le sait. Mais le sujet pourrait certainement faire l'objet d'une grande saga de science-fiction... Avis aux amateurs!

Référence: http://www.esri.com/news/arcuser/0610/nospin.html

⁶⁸ L'étude suppose que la Terre conserve son inclinaison et sa période de révolution autour du Soleil.

⁶⁹ La notion de force centrifuge est à manipuler délicatement, car il s'agit d'une force fictive : voir l'article du même auteur sur le pendule de Foucault.

⁷⁰ L'étude de la forme de la Terre constitue une discipline à part entière, la *Géodésie*.

LE PENDULE : LA VISION D'UN HOMME DE LETTRES

FABIEN BUISSERET (UMONS)

Hommage au passionnant roman d'Umberto Eco « Le Pendule de Foucault », ce texte en reprend quelques extraits, commentés par un physicien admiratif et facétieux.

AVANT-PROPOS

Depuis ses origines, le pendule de Foucault a toujours été une expérience marquante, et de même qu'elle a fasciné – et fascine toujours – les scientifiques, son impressionnant aspect visuel ainsi que l'invitation qu'elle lance (« Venez voir tourner la Terre ») en font une démonstration très attirante aux yeux du grand public.

Imaginons-nous un soir de l'année 1983, dans la chapelle Saint-Martin des Champs, au Musée des Arts et Métiers de Paris, où un pendule de Foucault est installé depuis 1855. Quelques curieux sont là, observant le spectacle. S'y trouvent un homme encore jeune, de type méditerranéen (appelons-le Casaubon), fixant le pendule d'un air halluciné, un couple d'étudiants semblant nettement moins concernés par l'expérience, et enfin un personnage sur lequel nous allons nous attarder.

Né près de Turin en 1932 et baptisé Umberto Eco, cet homme à la barbe grisonnante observe la scène d'un œil attentif, passant du pendule au public avec intérêt mais aussi amusement. Il a débuté sa carrière en 1954 comme journaliste à la RAI (télévision nationale italienne), après avoir défendu une thèse portant sur la philosophie médiévale. Ensuite, tout en restant dans le journalisme comme chroniqueur pour différents quotidiens, il continue une carrière universitaire, se spécialisant dans la sémiotique (étude des signes, de la langue et de ses non-dits, des symboles...). Umberto Eco devient d'ailleurs titulaire de la chaire de sémiotique de l'université de Bologne en 1971. Auteur de nombreux essais, il publie en 1980 son premier roman, le *Nom de la Rose*, enquête

sur un meurtre dans un monastère au Moyen Âge, qui connaîtra un énorme succès ainsi qu'une adaptation cinématographique.

Aujourd'hui, derrière ses épaisses lunettes, son regard brille : cette boule de métal, dont la lente oscillation nous révèle la rotation de la Terre, a quelque chose de magique,... (Casaubon, lui, semble toujours envoûté ; le couple d'étudiants est parti). Quelques années plus tard, en 1988, Umberto Eco publie le *pendule de Foucault*, roman dans lequel trois amis passionnés d'ésotérisme se livrent à une troublante relecture de l'Histoire, tentant par jeu d'y déceler une conspiration pour la domination mondiale, ourdie par le mystérieux Ordre des Templiers. Depuis, Eco continue de publier essais et romans, mais nous nous intéresserons ici aux premières pages du *pendule de Foucault*, narrées par Casaubon, le personnage principal, reflet de ce que voit l'écrivain lorsqu'il contemple le pendule de Foucault. Tout au long des citations de l'ouvrage (en italique), de brefs encadrés mettront en parallèle la vue du romancier et celle, peut-être d'apparence plus austère mais tout aussi passionnante, du physicien.

Il ne reste plus au lecteur, avant de continuer, qu'à bien observer la figure 01, et s'imaginer, lui aussi, pénétrant dans la chapelle, ...



fig. 01

La Chapelle
Saint-Martin
des Champs.

REGARDS FASCINÉS

«C'est alors que je vis le Pendule (fig. 02). La sphère, mobile à l'extrémité d'un long fil fixé à la voûte du chœur, décrivait ses amples oscillations avec une isochrone majesté. Je savais – mais quiconque aurait dû s'en rendre compte sous le charme de cette paisible respiration – que la période était réglée par la relation entre la racine carrée de la longueur du fil et ce nombre π (...). Je ne savais pas encore que, à la verticale du point de suspension,

à la base, un dispositif magnétique, communiquant son rappel à un cylindre caché au cœur de la sphère, garantissait la constance du mouvement, artifice destiné à contrecarrer les résistances de la matière, mais qui ne s'opposait pas à la loi du Pendule, lui permettant même de se manifester, car dans le vide n'importe quel point matériel lourd, suspendu à l'extrémité d'un fil inextensible et sans poids, qui ne subirait pas la résistance de l'air, et ne produirait pas de friction avec son point d'appui, eût oscillé, de façon régulière, pour l'éternité.»

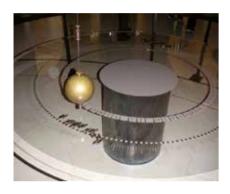


fig. 02

Le pendule de Foucault de la chapelle Saint-Martin.

La période d'oscillation T d'un pendule, soit le temps qu'il met pour effectuer un aller-retour complet, est, pour autant que l'oscillation ne soit pas de trop grande amplitude, donnée par la formule:

$$T=2 \pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

où g désigne l'accélération due à la gravitation et L la longueur du fil.

«[...] De la sphère de cuivre émanaient des reflets pâles et changeants, frappée qu'elle était par les derniers rayons du Soleil qui pénétraient à travers les vitraux. Si, comme autrefois, elle avait effleuré de sa pointe une couche de sable humide étendue sur les dalles du chœur, elle aurait dessiné à chaque oscillation un sillon léger sur le sol, et le sillon, changeant infinitésimalement de direction à chaque instant, se serait élargi de plus en plus en forme de brèche, de tranchée, laissant deviner une symétrie rayonnée [...]. Non, plutôt une histoire, enregistrée sur l'étendue d'un désert, de traces laissées par d'infinies caravanes erratiques. »

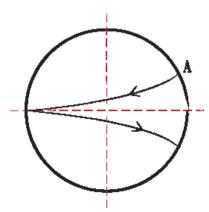


fig. 03

Trajectoire du pendule au cours d'une oscillation (lignes fléchées). Les écarts sont fortement exagérés.

Le plan d'oscillation du pendule de Foucault tourne au cours du temps du fait de la rotation de la Terre. Le temps en heures pour que le pendule revienne à son point de départ, disons en A, est donné par

$$T = \frac{24}{\sin \lambda}$$

où λ est la latitude du lieu. Au pôle par exemple, $\lambda = 90^{\circ}$ et le pendule reviendra en A au bout d'environ 24 heures.

«[...] Si j'étais longtemps resté, endurant le passage des heures, à fixer cette tête d'oiseau, cette pointe de lance, ce cimier renversé, tandis qu'il dessinait dans le vide ses propres diagonales, effleurant les points opposés de sa circonférence, astigmatique, j'aurais été victime d'une illusion fabulatrice, parce que le Pendule m'eût fait croire que le plan d'oscillation avait accompli une rotation complète, revenant au point de départ, en trente-deux heures, décrivant une ellipse aplatie – l'ellipse qui tourne autour de son centre à une vitesse angulaire uniforme, proportionnelle au sinus de la latitude. [...] Quoiqu'il en soit, l'expérience n'eût été parfaite qu'au Pôle, seul et unique lieu où le point de suspension se trouve sur le prolongement de l'axe de rotation de la Terre, et où le Pendule réaliserait son cycle apparent en vingt-quatre heures. »

«[...] Je savais bien que la Terre tournait, et moi avec elle, et Saint-Martin des Champs et tout Paris avec moi, et qu'ensemble nous tournions sous le Pendule qui, en réalité, ne changeait jamais la direction de son propre plan, parce que là-haut, d'où il pendait, et le long de l'infini prolongement idéal du fil, en haut vers les plus lointaines galaxies, se trouvait, figé pour l'éternité, le Point Immobile. [...] Le Pendule me disait que, tout en se mouvant, le globe, le système solaire, les nébuleuses, les trous noirs et toute la postérité de la grande émanation cosmique, depuis les premiers éons jusqu'à la matière la plus visqueuse, un seul point demeurait, pivot, cheville, crochet idéal, permettant à l'univers de se mouvoir autour de soi. »

Pour un observateur terrestre, le plan d'oscillation du pendule tourne au cours du temps. Cela est dû au fait que notre référentiel est constamment accéléré de par la rotation de la Terre. On dit qu'un tel référentiel est *non inertiel*. Si nous pouvions par exemple observer un pendule, situé au Pôle depuis un poste d'observation fixe (un référentiel d'inertie) où nous verrions la Terre tourner, nous constaterions que le plan d'oscillation du pendule reste fixe. La détermination de tels référentiels est un problème subtil, qui rejoint notamment les idées du philosophe et scientifique Ernst Mach (1838-1916).

REGARDS ABSENTS

Les envolées littéraires de Casaubon nous font partir de ce qui n'est rien d'autre qu'une simple boule pendant à un fil pour – suivant l'interprétation que la science fait du phénomène – remonter ce fil, et de là, contempler la rotation de la Terre, et finalement tout l'Univers avec des yeux émerveillés. Le plus important n'est donc pas le pendule, mais bien ce que nous pouvons apprendre à travers lui si nous y sommes attentifs. Malheureusement, tous ne partagent pas le même état d'esprit, et Umberto Eco nous livre ici un bel exemple à ne pas suivre...

« [...] Je tressaillis en entendant un dialogue, précis et nonchalant, entre un garçon avec des lunettes et une fille qui malheureusement n'en portait pas. « C'est le pendule

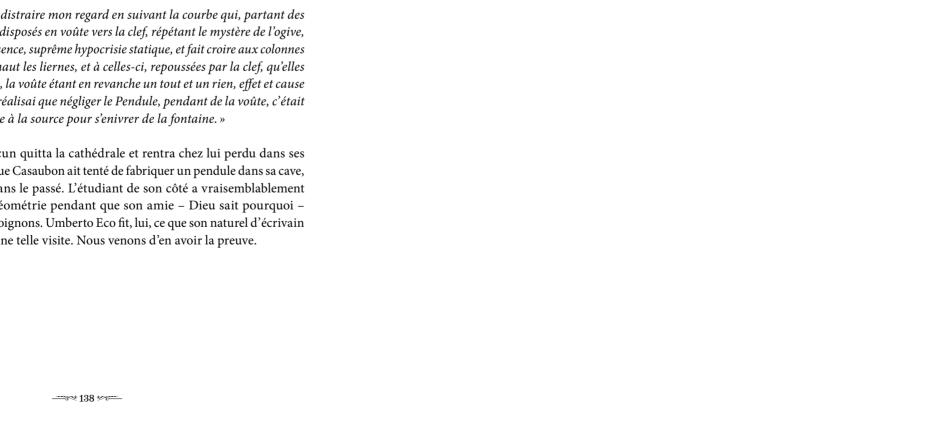
de Foucault, disait le garçon. Première expérience dans une cave en 1851, ensuite à l'Observatoire, et puis sous la coupole du Panthéon, avec un fil de soixante-sept mètres et une sphère de vingt-huit kilos. Enfin, depuis 1855 il est ici, en format réduit, et il pend par ce trou, au milieu de la voûte d'arête. – Et qu'est-ce qu'il fait, il pendouille et c'est tout ? – Il démontre la rotation de la Terre. Comme le point de suspension reste immobile... – Et pourquoi reste-t-il immobile? – Parce qu'un point... comment dire... dans son point central, écoute bien, chaque point qui se trouve précisément au milieu des points que tu vois, bien, ce point, le point géométrique, tu ne le vois pas, il n'a pas de dimensions, et ce qui n'a pas de dimensions ne peut aller ni à droite, ni à gauche, ni en bas ni en haut. Donc, il ne tourne pas. Tu piges? Si le point n'a pas de dimension, il ne peut pas même tourner autour de lui-même. Il n'a pas même... - Mais si la Terre tourne? – La Terre tourne mais le point ne tourne pas. Si ça te va, c'est comme ça, sinon tu vas te faire voir. D'accord? - C'est ses oignons. »

Misérable. Elle avait sur la tête l'unique endroit stable du cosmos, [...] et elle pensait que c'était Ses oignons, et pas les siens. Et sitôt après, en effet, le couple s'éloigna – lui, formé sur quelque manuel qui avait enténébré ses possibilités d'émerveillement; elle, inerte, inaccessible au frisson de l'infini. [...] Moi, je regardais avec révérence et peur. »

DERNIER HOMMAGE

«[...] J'ai cherché alors à distraire mon regard en suivant la courbe qui, partant des chapiteaux des colonnes disposés en voûte vers la clef, répétant le mystère de l'ogive, qui se soutient sur une absence, suprême hypocrisie statique, et fait croire aux colonnes qu'elles poussent vers le haut les liernes, et à celles-ci, repoussées par la clef, qu'elles fixent à terre les colonnes, la voûte étant en revanche un tout et un rien, effet et cause en même temps. Mais je réalisai que négliger le Pendule, pendant de la voûte, c'était comme s'abstenir de boire à la source pour s'enivrer de la fontaine. »

Ce jour de 1983, chacun quitta la cathédrale et rentra chez lui perdu dans ses pensées. Il est probable que Casaubon ait tenté de fabriquer un pendule dans sa cave, tout comme Foucault dans le passé. L'étudiant de son côté a vraisemblablement révisé son manuel de géométrie pendant que son amie - Dieu sait pourquoi préparait une soupe aux oignons. Umberto Eco fit, lui, ce que son naturel d'écrivain l'inclinait à faire après une telle visite. Nous venons d'en avoir la preuve.



REMERCIEMENTS

FRANCESCO LO BUE (UMONS)

Si vous avez pu voir la collégiale tourner, c'est grâce à une équipe passionnée de scientifiques et de techniciens aux compétences multiples.

Nos premiers remerciements vont à Jean-Pierre Toubeau et Jean Minez, techniciens de l'UMONS, véritables pères du pendule de Waudru : nous ne pourrons jamais assez les remercier !

Merci à nos collègues théoriciens Nicolas Boulanger, Pierre Gillis, Claude Semay et Philippe Spindel qui nous ont permis, au fil des éditions, d'approfondir notre compréhension du pendule.

Merci à Fabien Buisseret, Hossam Elkhadem et Francis Michel pour leurs importantes contributions à cet ouvrage.

Merci à Fabian Debal pour ses compétences et sa légendaire patience : jamais il ne s'est lassé de nos discussions *spiralaires* et *périodiques* concernant les subtilités de l'effet de la rotation terrestre sur la météorologie! Le fruit de ces passionnants échanges est présenté ici sous la forme d'un article totalement revu et enrichi.

Merci à la dynamique équipe du projet *Hypergothique transparent* grâce à laquelle nous avons pu vivre la collégiale et nous imprégner de son histoire fascinante. Nos remerciements particuliers vont à Philippe Collart, Anne Deprez, Maxime Duménil et Jenny Tondreau.

Merci à Michel Fievez à qui nous devons la réalisation de la troublante expérience de la tige oscillante, ainsi que la construction du manège de Coriolis, l'un des éléments essentiels de notre dispositif expérimental. Merci aussi à Christophe Saussez pour les améliorations apportées à ce manège et pour la construction du très élégant dispositif des pendules synchronisés.

Merci à Olivier Verlinden, Régis Berton et Kévin Nis qui ont conçu l'étonnant compas gyroscopique. Il ne nous sera désormais plus possible de perdre le Nord!

Merci à Bernard Foucart du service de Neurosciences : son enthousiasme et ses grandes compétences en électronique nous ont permis de faire nos premiers pas sur la piste du pendule auto-entretenu!

Merci à Marc Rosoor pour son implication dans l'aventure : sa maîtrise dans le domaine de l'audiovisuel aura permis aux nombreux visiteurs de mieux visualiser les mystères de Coriolis !

Merci à Alain Lechien, David Paolini et Damien Bury pour leur aide précieuse, notamment dans le volet sonorisation de l'événement : grâce à eux, nous pourrions même entendre la Terre tourner !

Merci à Olivier Van Overschelde et Grégory Guisbiers qui, il y a un peu plus de dix ans, ont suggéré la brillante idée de créer et d'installer à Mons un pendule de Foucault : nul doute qu'ils furent particulièrement bien inspirés !

Merci à Dominique Wynsberghe pour ses relectures et ses suggestions toujours pertinentes.

Merci à Charles Cabre et Armand Alberico, étudiants à la Haute École de la Communauté française en Hainaut (HEH – Campus pédagogique de Mons), qui ont développé le concept du mini-pendule à emporter chez soi!

Merci à Soizic Mélin pour la richesse des discussions didactiques qui alimentent la préparation de chaque nouvelle édition du pendule ; merci pour l'important travail de réécriture des textes, ainsi que pour la création du mini-kit pendule pour les enfants !

Merci à la Fabrique d'Église Sainte-Waudru qui a offert à notre pendule le plus bel écrin qu'il soit rêvé d'imaginer.

Merci à aux guides qui ont donné de leur temps afin de partager avec les visiteurs leur plaisir d'explorer et de comprendre mécanismes qui régissent l'Univers.

Merci à Luc Vandensteene et à son équipe pour la création de la superbe belle ligne graphique, désormais intemporelle, mais sans cesse renouvelée.

Merci aux autorités de l'Université de Mons pour leur soutien, et l'intérêt qu'elles portent à nos réalisations.

Enfin, notre reconnaissance va aussi à la DGO6 du Service Public de Wallonie pour la confiance qu'elle nous accorde en soutenant financièrement et moralement nos actions. Sans elle, rien de tout ceci n'aurait été possible.

COLOPHON

CONCEPTION ET RÉALISATION DU PENDULE

Jean-Pierre Toubeau Jean Minez

COMMISSAIRE

Francesco Lo Bue

GROUPE 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 DES TEXTES

Fabien Buisseret
Calogero Conti
Fabian Debal
Maxime Duménil
Hossam Elkhadem
Pierre Gillis
Francesco Lo Bue
Soizic Mélin
Francis Michel
Claude Semay

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)

DÉVELOPPEMENT DES EXPÉRIENCES CONNEXES

Armand Alberico Régis Berton Charles Cabre Michel Fievez Bernard Foucart Jean Minez Soizic Mélin Kévin Nis Marc Rosoor Jean-Pierre Toubeau Olivier Verlinden Christophe Saussez

PARTENARIAT

Fabrique d'Église Sainte-Waudru

CONCEPTION GRAPHIQUE

ÉDITEUR

Luc Vandensteene assisté d'Amandine Vandeputte www.exnihilo.be

RESPONSABLE Calogero Conti,

Recteur Université de Mons 20, Place du Parc 7000 Mons www.umons.ac.be

SOUTIEN AUDIOVISUEL

Damien Bury Alain Lechien David Paolini Marc Rosoor

CRÉDITS

VOIR LA TERRE TOURNER

fig. 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 09, 10 Ex Nihilo

fig. 08 UMONS

fig. 11

François Arago, Astronomie populaire, Tome 3, 1856

LA TERRE : SPHÈRE OU DISQUE ?

fig. 01, 04

Segni e sogni della terra, il disegno del mondo dal mito di Atlante alla geografia delle reti, De Agostini, 2001.

fig. 02 Carte de Ptolémée, Venise, 1511, UMONS.

fig. 03

Jean Mansel, *La Fleur des histoires*, Cabinet des Manuscrits ; Bibliothèque royale de Belgique

LORSQUE GALILÉE INVENTAIT LA PHYSIQUE

fig. 03

Andreas Cellarius, *Harmonia* macrocosmica, 1661

fig. 06

Ex Nihilo

fig. 08

Johannes Kepler, Mysterium Cosmographicum, 1596

LES CONTRIBUTIONS DE LÉON FOUCAULT À LA SCIENCE ET AUX TECHNIQUES

fig. 02 Banque d'images BIU Santé,

Université Paris-Descartes

fig. 03 UMONS fig. 04, 05, 06, 07, 13, 15, 16, 17, 18 Ex Nihilo

fig. 08

L'Illustration, 5 avril 1851

fig. 09

François-Étienne Villeret, Panthéon de Paris, 1866

fig. 10

L'expérience du pendule de Léon Foucault au Panthéon de Paris, en 1851, La Nature, 1887, 2° semestre.

fig. 11

François Arago, *Astronomie* populaire, Tome 3, 1856

fig. 12

Louis Figuier, *Les Merveilles de la science*, 1867 - 1891, Tome 1

fig. 14

Adolphe Ganot, *Traité* de Physique, 20° édition, Hachette & Co, 1887.

LE PENDULE DE FOUCAULT : UN PEU DE THÉORIE

fig. 01 à 07 Ex Nihilo

PENDULE ET GRANDEURS PHYSIQUES

fig. 01 Ex Nihilo

ROTATION DE LA TERRE ET MÉTÉO

fig. 01 à 04 Ex Nihilo

fig. 05

image satellite Aqua/ MODIS, NASA

LE GRAND HÉRITAGE DES CHANOINESSES

fig. 01, 03, 04, 05, 07, 09 Benoît Feron fig. 02

Vincent Rousseau

fig. 08

Philippe Collart

DANS LES COULISSES DU PENDULE DE WAUDRU

fig. 01 à 13 UMONS

ET SI LA TERRE TOURNAIT PLUS VITE?

fig. 01 Ex Nihilo

fig. 02

Eddy Paape, *Journal de Spirou*, 759, Dupuis, 1952.

ET SI LA TERRE CESSAIT DE TOURNER ?

fig. 01, 02

Witold Fraczek, If the Earth Stood Still, ESRI (Environmental Systems Research Institute), USA, 2010.

LE PENDULE : LA VISION D'UN HOMME DE LETTRES

fig. 01

Wikimedia, par l'utilisateur Pline, sous la licence CC BY-SA-2.5.

fig. 02

Wikimedia, par l'utilisateur Cdang, sous la licence CC BY-SA-3.0

fig. 03 Ex Nihilo