

# Les preuves expérimentales des mouvements de la Terre

par **Jean SIVARDIÈRE**

CEA - Département de Recherche Fondamentale  
sur la Matière Condensée

SPSMS - 38054 Grenoble Cedex 9

sivardiere@wanadoo.fr

## RÉSUMÉ

*Nous rassemblons dans cette note les preuves expérimentales des deux mouvements principaux de la Terre par rapport aux étoiles fixes : sa rotation propre et sa révolution autour du Soleil. Le caractère absolu de la rotation propre est mis en évidence par des expériences « terrestres » produisant des effets physiques observables sans se référer à un repère extérieur à la Terre. L'existence d'un mouvement relatif annuel l'est par des observations astronomiques, mais son caractère absolu ne peut être démontré directement.*

## INTRODUCTION

Selon un sondage réalisé par l'institut Harris Interactive pour le compte de l'Académie des sciences de Californie, cité par *Le Monde* du 12 mai 2001, « plus d'un Américain sur deux ignore que la Terre tourne autour du Soleil en un an ». Il est vrai qu'il est difficile, comme l'a rappelé récemment Francis BEAUBOIS [1], de trouver des preuves expérimentales irréfutables des deux mouvements de la Terre, diurne et annuel, dont aucun de nos sens ne nous révèle immédiatement l'existence (nous laissons ici de côté les autres mouvements de la Terre : précession et nutation de l'axe terrestre, irrégularités de la rotation diurne, révolution autour du centre de la Galaxie). Dans cet article, nous passons en revue ces différentes preuves. Pour plus de détails, on se reportera utilement aux références [2] et [3].

L'étude des deux mouvements se présente en des termes bien différents :

- ♦ L'existence d'un mouvement relatif de rotation de la Terre et des étoiles, ou « mouvement diurne », est une évidence pour l'astronome qui observe le ciel étoilé pendant une nuit entière : il voit les étoiles basculer en bloc d'Est en Ouest autour de l'axe polaire. Le problème est de savoir si on peut préciser le mouvement absolu : est-ce la Terre qui tourne par rapport à l'ensemble des étoiles fixes, ou le contraire ?
- ♦ Le modèle de Copernic suppose un mouvement relatif de translation accélérée du référentiel barycentrique de la Terre par rapport aux étoiles fixes et même au Soleil, ou « mouvement annuel ». Ici le problème est d'abord de savoir si un tel mouvement existe, c'est-à-dire s'il peut être mis en évidence.

## 1. LE MOUVEMENT DIURNE DE LA TERRE

### 1.1. Hypothèse du mouvement diurne absolu et objections

#### 1.1.1. Les objections d'Aristote

Héraclide DU PONT soutient l'existence d'un mouvement diurne absolu de la Terre, d'Ouest en Est, par rapport aux étoiles. Son contemporain ARISTOTE lui oppose l'objection suivante : si la Terre n'est pas immobile dans l'espace mais tourne sur elle-même, une pierre lancée verticalement depuis le sol ou lâchée du haut d'une tour doit tomber vers l'Ouest. Selon la mécanique d'ARISTOTE, en effet, un corps cesse de se mouvoir s'il n'est soumis à aucune force. Une fois lancée ou lâchée, la pierre devrait donc cesser de suivre la Terre dans son mouvement d'Ouest en Est. De même les oiseaux et les nuages doivent être emportés par un violent vent d'Est.

La force de gravitation étant alors inconnue, d'autres objections sont opposées à une éventuelle rotation diurne de la Terre : les hommes devraient vivre la tête en bas une partie du jour ; la Terre pourrait même éclater en morceaux, un point de l'Équateur devant avoir, selon PTOLÉMÉE, « une vitesse fantastique » (c'est seulement en 1669 que HUYGENS donnera l'expression de la force centrifuge, qui fait intervenir cette vitesse mais aussi le rayon de la Terre).

#### 1.1.2. Critique du point de vue d'Aristote

L'erreur d'ARISTOTE commence à être comprise dès le Moyen Age : selon ORESME (1320-1382), la Terre communique à la pierre une vitesse d'entraînement horizontale. La pierre tourne à la même vitesse angulaire que la Terre, et doit donc retomber sur la tête du lanceur ou au pied de la tour. Pour la même raison, le mouvement de la Terre ne s'accompagne d'aucun « vent », l'atmosphère étant entraînée dans le mouvement de rotation de la Terre.

L'erreur d'ARISTOTE persiste à la Renaissance. TYCHO-BRAHÉ estime ainsi que la portée d'un canon doit être nettement plus grande vers l'Ouest que vers l'Est si la Terre tourne sur elle-même d'Ouest en Est.

L'expérience du lancer vertical est tentée vers 1634 avec un canon, sur la suggestion de DESCARTES, par MERSENNE et PETIT, Intendant des Fortifications : elle ne permet pas de conclure car « le premier boulet retomba 2000 pieds à l'Ouest, le deuxième autant à l'Est, le troisième ne fut pas retrouvé »... et les expérimentateurs, par prudence, n'insistèrent pas. DESCARTES suggère alors que le boulet a échappé à l'action de la pesanteur !

En 1640, GASSENDI vérifie qu'une pierre lâchée du haut du mât d'un bateau se déplaçant au large de Marseille à vitesse constante tombe, selon la prédiction de GIOR-DANO Bruno et de GALILÉE, au pied du mât et non en arrière. La notion de vitesse d'entraînement est ainsi confirmée. L'Academia del Cimento réalise une expérience analogue : un boulet est tiré verticalement depuis un canon monté sur un wagon : que le wagon soit immobile ou se déplace à vitesse constante, le boulet retombe près de la gueule du canon.

Ceci étant, l'argument d'ORESME n'élimine pas l'hypothèse de la fixité de la Terre. Quant à GALILÉE, il assimile à tort translation uniforme du bateau et rotation uniforme de la Terre : il affirme l'impossibilité de constater le mouvement de rotation de la Terre par des expériences mécaniques, le résultat devant être le même, selon lui, que la Terre soit en repos ou en mouvement. NEWTON corrigera cette erreur encore présente chez LAPLACE. GALILÉE, revenant sur ce problème, montrera lui-même que la rotation de la Terre implique une très faible déviation des projectiles, indétectable expérimentalement selon lui.

### **1.1.3. Mouvement diurne et marées**

En 1616, GALILÉE cherche à démontrer que l'existence des marées est liée à la rotation de la Terre et à son mouvement orbital [4]. Ces deux mouvements de rotation se faisant dans le même sens, une portion de la Terre située à l'opposé du Soleil se déplace plus vite par rapport au Soleil que la portion lui faisant face. Chaque portion de la Terre a donc une vitesse qui varie avec une période de 24 heures : selon GALILÉE, un océan se comporte alors comme une masse d'eau transportée dans un réservoir dont la vitesse varie périodiquement.

Bien entendu la rotation diurne de la Terre est un ingrédient indispensable pour expliquer le phénomène des marées, mais la théorie de GALILÉE n'explique pas pourquoi la période des marées est de 12 heures environ, et non de 24 : la théorie de la gravitation est incontournable. Curieusement GALILÉE ne mentionne pas la Lune, alors que son intervention dans le phénomène était connue des Grecs, depuis le voyage de PYTHÉAS le Massaliote aux Îles Britanniques.

L'astronome mésopotamien SÉLEUCUS avait lui aussi cherché à expliquer l'existence des marées à partir de la rotation diurne de la Terre : selon lui, la révolution de la Lune autour de la Terre comprime l'atmosphère, les tourbillons ainsi créés provoquant les marées (cette révolution s'effectue dans le même sens que la rotation diurne de la Terre vue dans le référentiel de Copernic, mais en sens contraire vue de la Terre).

### **1.1.4. Plausibilité du mouvement diurne absolu**

Grâce à la lunette astronomique, GALILÉE observe la rotation propre du Soleil puis, en 1659, HUYGENS observe celle de Mars et, en 1665, Jean-Dominique CASSINI celle de Jupiter : il voit la tache rouge faire un tour en 9 heures. Ces observations rendent plus plausible l'hypothèse du caractère absolu de la rotation propre de la Terre, mais aucune observation astronomique élémentaire ne la démontre directement.

En réalité, pour démontrer que la Terre tourne sur elle-même, il faut pouvoir montrer qu'un repère terrestre n'est pas galiléen : de nombreux phénomènes géophysiques et expériences mécaniques mettent en évidence les forces d'inertie, centrifuge et de Coriolis, qui s'y manifestent [5]. Ces forces sont explicitées par CLAIRAUT au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, puis par CORIOLIS vers 1830 et HERTZ vers 1880.

## 1.2. Preuves physiques du mouvement diurne absolu

### 1.2.1. Mise en évidence de la force centrifuge

La force centrifuge, nulle au pôle et maximale à l'Équateur, est responsable de l'aplatissement de la Terre, prévu par HUYGENS et NEWTON (CASSINI et son fils, lui aussi astronome, pensaient au contraire que la Terre était allongée parallèlement à son axe). L'existence de l'aplatissement est confirmée par les mesures géodésiques effectuées entre 1735 et 1744 lors des expéditions envoyées en Laponie (CLAIRAUT, MAUPERTUIS) et au Pérou (LA CONDAMINE, BOUGUER, GODIN, JUSSIEU) par l'Académie royale des sciences de Paris. Par observation directe, CASSINI mesure en 1691 l'aplatissement de Jupiter, de l'ordre de 1/15.

La force centrifuge, conjointement avec l'aplatissement de la Terre, est à l'origine de la variation de la pesanteur effective avec la latitude : prévue par HUYGENS, cette variation est mise en évidence en 1672 par RICHER, qui compare les oscillations d'un pendule à Paris et à Cayenne.

La théorie de l'aplatissement proposée par NEWTON est perfectionnée par CLAIRAUT en 1743 : il fait l'hypothèse que la Terre possède un noyau dense et calcule une valeur de l'aplatissement, environ 1/300, en bon accord avec l'expérience, alors que NEWTON avait obtenu la valeur 1/230<sup>(1)</sup>.

À la même époque, D'ALEMBERT étudie la précession des équinoxes et LAPLACE explique le mouvement de la Lune : tous deux tiennent compte de l'aplatissement de la Terre et confirment sa valeur.

La force centrifuge est également responsable de l'écart angulaire, maximal à la latitude de 45° où il est de l'ordre de 6', entre la direction du champ de gravitation à la surface de la Terre et la direction du champ effectif de pesanteur : nous ignorons si cet angle a pu être mesuré directement.

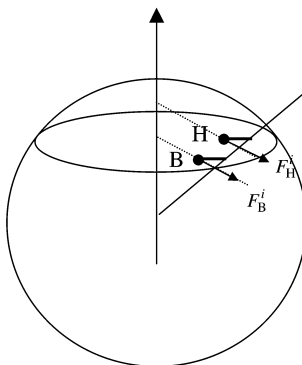
En 1836, GUYOT cherche à mettre en évidence la force centrifuge, variable avec l'altitude, en observant dans un bain de mercure l'image d'un fil à plomb portant deux sphères accrochées à des hauteurs différentes [2]. Dans le même esprit, vers 1850, PUISEUX puis d'Abbadie comparent, sans succès, les images d'un même fil à plomb dans deux bains de mercure situés à des hauteurs différentes.

Cependant l'expérience du « pendule horizontal » de HENGLER (cf. figure 1 ci-contre), réalisée en 1832, confirme qualitativement l'existence de la force centrifuge : un fléau horizontal, mobile autour d'un axe vertical, porte à une extrémité un poids dont on

(1) **NDLR** : On distingue actuellement la surface matérielle de la Terre (S1) de celle du géoïde terrestre (S2) et de celle de l'ellipsoïde de référence (S3) ; ce dernier est choisi de façon à minimiser ses écarts avec (S2). On ne définit d'aplatissement que pour (S3), si on l'approche par un ellipsoïde de révolution. C'est ce qu'a fait l'UAI en 1964 avec  $a = 6378,16$  km,  $b = 6356,78$  km et  $e = 1/228,25$ .

Les satellites affinent notre connaissance des écarts entre (S2) et (S3) : actuellement, on s'intéresse à leur caractère fractal à partir de leur développement de Laplace.

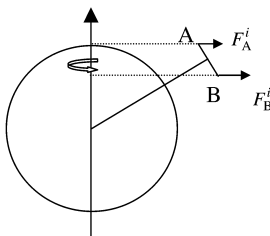
peut faire varier l'altitude ; s'il est à l'équilibre dans la direction Est-Ouest, il subit une déviation vers le Sud quand le poids est remonté.



**Figure 1 :** Pendule horizontal de Hengler.

Quand le poids est mis au point H plus haut que le point B, l'accroissement de la force d'inertie centrifuge fait tourner le fléau vers le Sud.

Une expérience voisine a été réalisée en 1917 par EÖTVÖS (cf. figure 2). Le fléau d'une balance est mis à l'équilibre quand il est orienté dans la direction Est-Ouest, l'équilibre est rompu si le fléau est ensuite orienté dans la direction Nord-Sud : le fléau s'incline du côté Sud [6].



**Figure 2 :** Expérience d'Eötvös.

Quand le fléau AB de la balance est parallèle à la direction Est-Ouest, les forces d'inertie sont égales ; mais lorsqu'elles sont parallèles à la direction Nord-Sud, la force d'inertie en B est supérieure à celle en A, donc B monte et A descend.

### 1.2.2. Mise en évidence de la force de Coriolis

La force de Coriolis explique la déviation vers l'Est de la chute des corps (loi de Ferrel), prévue en 1679 par NEWTON, et calculée par LAPLACE, OLBERS, GAUSS (1803) et POISSON (1838).

À la suite d'expériences peu précises de HOOKE en 1679, cette déviation est mise en évidence par GUGLIELMINI en 1790, par BENZENBERG en 1802-1804, par REICH en 1831, par HALL en 1902 et par FLAMMARION en 1903 (cf. le Bulletin de la Société Astro-

nomique de France, juillet 1903), en bon accord avec la théorie 3,5. Son existence est vérifiée par HAGEN (1912) et GIANFRANCESCHI (1913) à l'aide d'une machine d'Atwood, qui permet de freiner la chute du corps, avec une hauteur de chute d'une vingtaine de mètres.

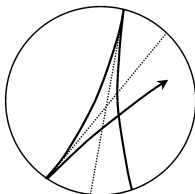
(Si on lance une pierre vers le haut depuis le sol, elle retombe à l'ouest de la verticale du point de lancement. Si  $h$  est l'altitude maximale atteinte, on peut montrer que la déviation vers l'Ouest est égale à quatre fois la déviation vers l'Est observée pour une chute libre sur une hauteur  $h$ . La mesure de la déviation est évidemment délicate et n'a pas été tentée à notre connaissance.)

La force de Coriolis est également responsable de la déviation vers la droite (dans l'hémisphère nord) des mouvements horizontaux.

De nombreux phénomènes géophysiques et climatiques sont ainsi interprétés depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle (Hadley) : vents dominants (alizés, vents d'ouest, jet streams), déviation des courants d'air se dirigeant vers une basse pression (loi de Buys-Ballot) et formation des cyclones en équilibre géostrophique, courants marins, déviation des courants de marée, upwelling [7], loi de Baer (un fleuve de l'hémisphère nord creuse davantage ses méandres à droite que ses méandres à gauche).

La force de Coriolis se manifeste aussi dans les fameuses expériences du pendule (1850) et du gyroscope de Foucault (1852).

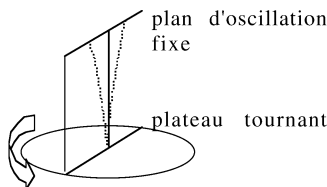
Dans l'expérience du pendule, déjà envisagée par POISSON en 1828, le mouvement horizontal est répétitif, les déviations vers la droite s'accumulent et deviennent aisément observables (*cf.* figure 3). À cette influence de la rotation terrestre se superpose une précession de l'orbite (elliptique par rapport à un repère fixe) du pendule due aux termes anharmoniques du potentiel (la force de rappel du pendule n'est pas rigoureusement proportionnelle à son élongation). Cette précession se fait toujours dans le sens du mouvement et sa vitesse est proportionnelle à l'aire de l'orbite : l'interprétation de l'expérience est donc moins immédiate qu'on ne l'affirme généralement.



**Figure 3 :** Trajectoire du centre de masse du pendule de Foucault sur une oscillation : dans l'hémisphère nord, il dévie à chaque fois vers la droite par rapport à son mouvement.

Dans une expérience préliminaire, FOUCAULT avait étudié les oscillations d'une tige élastique fixée au centre d'un plateau tournant : il avait observé que le plan d'oscillation de la tige était fixe par rapport aux murs du laboratoire (*cf.* figure 4 ci-contre). L'expérience du pendule de FOUCAULT a été reproduite peu après à la cathédrale de Saint Péters-

bourg : comme prévu par la théorie, la précession y est plus rapide qu'à Paris.

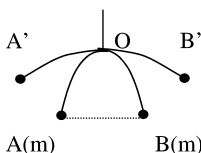


**Figure 4 :** Oscillations d'une tige élastique dans un plan fixe.

En 1851, BRAVAIS vérifie qu'en raison du mouvement diurne de la Terre, la période de rotation d'un pendule conique dépend de son sens de rotation : la mise en évidence du mouvement diurne de la Terre est encore plus directe que dans l'expérience du pendule de Foucault. L'expérience a été reprise sous une forme voisine par BERGET [6].

Dans l'expérience du gyroscope de Foucault, l'axe de rotation est fixe par rapport aux étoiles et tourne lentement par rapport à la Terre. Plus précisément, le gyroscope est suspendu par son centre d'inertie  $G$  et son axe tourne autour de la parallèle à l'axe polaire passant par  $G$ .

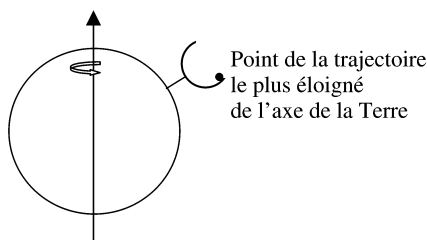
En 1851, POINSOT propose une expérience très simple (*cf.* figure 5). Soit un système pesant suspendu à un fil, pouvant tourner librement autour de la verticale, déformable par le jeu de ressorts intérieurs, et initialement au repos par rapport à la Terre. Lors d'une variation brutale de son moment d'inertie, le moment des forces d'inertie doit provoquer une rotation dont l'observation peut permettre la détermination de la latitude du lieu de l'expérience. En 1908, HAGEN [2] reprend la suggestion de POINSOT et démontre la rotation diurne de la Terre à l'aide de son « isotoméographe », appareil comportant des chariots dont le mouvement horizontal est provoqué par la chute d'un poids selon l'axe vertical de l'appareil.



**Figure 5 :** Expérience de Poinsot.

AOB est une lame souple faisant office de ressort. Elle est maintenue fléchie par le fil AB ; quand on le coupe, la lame se détend et prend la position A'B'.

L'expérience suivante a été suggérée à la même époque (nous ignorons par qui, et si elle a été réalisée avec succès). Soit un cylindre de révolution creux, disposé perpendiculairement au méridien local (*cf.* figure 6 ci-après). On pose une petite bille sur sa paroi intérieure et on la laisse osciller : un calcul élémentaire montre qu'elle dérive lentement vers l'Est, à une vitesse proportionnelle à la vitesse angulaire de la Terre, si la position initiale de la bille est le point de la trajectoire le plus éloigné de l'axe de la Terre ; la dérive se fait vers l'Ouest dans le cas contraire.



**Figure 6 :** Dérive d'une bille oscillant quasiment dans un plan méridien.

En 1913, COMPTON [8] démontre la rotation diurne de la Terre par une expérience très originale. Un tore de verre est placé dans un plan perpendiculaire à l'axe de la Terre, il contient une suspension de particules solides dans l'eau. Une fois le mouvement résiduel de la suspension amorti, les particules situées dans la partie haute du tore sont entraînées plus vite (vers l'Est) par la rotation de la Terre que les particules situées dans la partie basse. Si le tore subit une rotation brusque de  $180^\circ$  autour de son diamètre horizontal Est-Ouest, on observe une rotation d'ensemble de la suspension par rapport au tube. L'expérience est analogue à l'induction d'un courant électrique dans un conducteur circulaire déplacé dans un champ magnétique.

On remarquera que la déviation de la chute des corps vers l'Est fournit la composante horizontale du vecteur de rotation diurne, tandis que l'expérience de Foucault en fournit la composante verticale. Si on fait varier l'orientation du tube, l'expérience de Compton peut fournir les deux composantes : on peut en déduire la latitude du lieu de l'expérience et la durée du jour.

En balistique, il faut tenir compte de l'existence de la force de Coriolis. Ainsi, au cours de la guerre 1914-1918, les marines anglaise et allemande s'affrontèrent au large des îles Falkland, de latitude  $-50^\circ$  : les Anglais manquaient systématiquement leurs cibles avant de corriger leurs tables d'artillerie, établies pour l'hémisphère nord.

La force de Coriolis agissant sur un projectile a aussi une composante verticale qui augmente la portée si on tire vers l'Est et la réduit si on tire vers l'Ouest.

La précession des cellules de Bénard-Marangoni d'un liquide placé dans un récipient cylindrique chauffé par sa face inférieure a été interprétée comme une conséquence de la rotation de la Terre [9].

La force de Coriolis affecte la trajectoire des neutrons qui sortent horizontalement d'un réacteur, et il faut la prendre en compte pour interpréter les expériences d'interférométrie neutronique [10].

La vidange d'un réservoir circulaire contenant un liquide au repos fournit une mise en évidence très directe (mais délicate) de la rotation terrestre [11] : un tourbillon positif apparaît dans l'hémisphère nord, il s'inverse si on transporte l'expérience dans l'hémisphère sud.



Signalons enfin la mise en évidence de la rotation diurne de la Terre par des expériences exploitant les propriétés quantiques macroscopiques de l'hélium suprafluide<sup>(2)</sup> : en raison de la quantification de sa circulation, une masse d'hélium suprafluide dans un container se comporte comme un gyroscope de Foucault [12].

### **1.2.3. Mise en évidence optique du mouvement diurne absolu**

À notre connaissance, une seule expérience non mécanique permet de tester une rotation absolue de la Terre, de même que celle de MICHELSON-MORLEY avait testé auparavant une translation absolue de la Terre : c'est l'expérience de MICHELSON-GALE-PEARSON (1925) [13].

Dans les expériences antérieures de HARRESS (1912) et de SAGNAC et POGANY (1913), un faisceau lumineux monochromatique est dédoublé en deux faisceaux qui interfèrent après réflexion sur des miroirs verticaux fixés aux sommets d'un plateau carré. Si le plateau tourne à la vitesse angulaire  $\omega$ , on observe un déplacement des franges d'interférence proportionnel à  $\omega$  et à l'aire du circuit lumineux en accord avec la théorie classique ; LANGEVIN a confirmé ce résultat par la théorie de la relativité générale.

Dans l'expérience de MICHELSON-GALE-PEARSON (1925), la Terre elle-même remplace le plateau tournant et la composante verticale du vecteur de rotation de la Terre remplace  $\omega$ . Le circuit lumineux utilisé est un rectangle de côtés 340 et 610 mètres.

Notons aussi que l'existence d'un champ magnétique terrestre, orienté grossièrement selon l'axe polaire, est une conséquence indirecte de la rotation propre de la Terre. Il fluctue en même temps que les mouvements du noyau de fer liquide de la Terre qui le génèrent.

Bien entendu, cette rotation est observable directement depuis un satellite artificiel : l'orbite du satellite est approximativement située dans un plan fixe par rapport aux étoiles, l'astronaute voit donc directement la Terre tourner autour de son axe.

## **2. LE MOUVEMENT ANNUEL DE LA TERRE**

### **2.1. Hypothèse du mouvement annuel**

#### **2.1.1. Objections des Grecs**

Le pythagoricien PHILOLAOS imagine un mouvement de rotation circulaire de la Terre autour d'un « feu central » distinct du Soleil. Puis ARISTARQUE, précurseur de COPERNIC, affirme, au milieu du III<sup>e</sup> siècle avant Jésus-Christ, que la Terre tourne autour du Soleil en un an.

Le modèle géocentrique de PTOLÉMÉE rend compte correctement du mouvement des

(2) **NDLR** : État de l'hélium liquide tel que sa viscosité disparaît : ce phénomène d'origine quantique s'apparente à une condensation de Bose-Einstein et se manifeste donc dès que la température devient inférieure à une valeur critique  $T_c$  (p).  $T_c$  (1 atm) = 2,172 K.

planètes. Cependant il explique mal les fortes variations d'éclat des planètes. C'est d'ailleurs ce phénomène qui avait amené HÉRACLIDE à imaginer un modèle semi-héliocentrique dans lequel Vénus, observée (comme Mercure) dans une direction qui oscille autour de celle du Soleil, tourne autour du Soleil - modèle qu'ARISTARQUE étend à toutes les planètes, Terre comprise, et que le mésopotamien SÉLEUCUS, un siècle plus tard, est le seul à reprendre avant COPERNIC (il est étonnant que les autres astronomes de cette époque ne se soient pas interrogés sur l'omniprésence de l'année sidérale dans le modèle de PTOLÉMÉE).

Les Grecs rejettent le modèle d'ARISTARQUE, car un mouvement orbital de la Terre implique une modification périodique de l'aspect des constellations alors qu'aucune parallaxe annuelle des étoiles ne peut être observée : ARISTARQUE répond à cette objection en suggérant que le rayon de l'orbite terrestre est négligeable devant celui de la « sphère des fixes » mais ARCHIMÈDE lui-même rejette cette explication.

Il semble également impossible aux Grecs que la Lune puisse suivre la Terre dans son mouvement autour du Soleil. Enfin, avec ARISTOTE, ils considèrent que la Terre est lourde : elle ne peut tourner autour des astres, impondérables, et doit donc se trouver au centre de l'univers.

### **2.1.2. Plausibilité du mouvement annuel**

Le modèle de COPERNIC a, sur celui de PTOLÉMÉE, l'avantage d'une grande simplicité : il unifie la description des mouvements des planètes inférieures et supérieures, bien différents pour un observateur terrestre, et explique simplement les élongations maximales de Vénus et Mercure et les rétrogradations des planètes, ainsi que leurs variations d'éclat ; il permet d'évaluer les distances relatives des planètes au Soleil, met en évidence une variation régulière de leur période de révolution avec la distance au Soleil, et permet d'interpréter l'existence des saisons.

Mais ce modèle, aussi séduisant soit-il, n'est qu'une construction théorique compatible avec les observations astronomiques et ne démontre pas la réalité du mouvement annuel de la Terre. Il n'est pas accepté par TYCHO-BRAHÉ, qui extrapole à toutes les planètes sauf la Terre le modèle semi-héliocentrique d'HÉRACLIDE.

Les observations de GALILÉE à la lunette astronomique (1609) crédibilisent le modèle héliocentrique de COPERNIC, mais sans en apporter de preuve irréfutable. Les phases de Vénus sont inexplicables dans le modèle de PTOLÉMÉE [1] et aisément compréhensibles dans celui de COPERNIC (il en est de même de la forte variation de son diamètre apparent entre deux conjonctions inférieure et supérieure). Leur existence est cependant compatible avec le modèle de TYCHO-BRAHÉ.

La découverte des quatre satellites médicéens de Jupiter démontre qu'il existe des corps célestes tournant autour d'un autre astre que la Terre, selon des orbites apparemment circulaires et non épicycliques, la période de révolution augmentant avec la distance à cet astre ; elle rend plausible l'entraînement de la Lune par la Terre. L'observation des

phases de Mercure par HÉVÉLIUS, quelques années plus tard, renforce les partisans de COPERNIC.

L'observation par GASSENDI du transit de Mercure en 1631 et de celui de Vénus en 1639, phénomènes prédits avec précision par KEPLER, puis la découverte, par VENDELINUS, que les satellites de Jupiter satisfont une troisième loi de Kepler, confirment la plausibilité du modèle héliocentrique de COPERNIC, corrigé par KEPLER qui remplace les cercles par des ellipses et élimine définitivement les épicycles.

Même à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, cependant, seule la grande simplicité du système héliocentrique plaide en sa faveur : KEPLER, en particulier, souligne l'égalité de traitement par COPERNIC des planètes inférieures et supérieures. La découverte de la gravitation universelle par NEWTON en donne une interprétation physique mais n'en constitue pas à proprement parler une preuve.

## 2.2. Preuves astronomiques du mouvement annuel

En 1676, le danois RÖMER découvre une irrégularité, de période égale à un an, des périodes de révolution des satellites de Jupiter. Il l'interprète sur la base du modèle héliocentrique, en admettant que la vitesse de la lumière est finie. Une fois la distance Terre-Soleil déterminée par CASSINI et RICHER et par FLEMSTED, HUYGENS calcule cette vitesse à partir des observations de RÖMER.

La découverte de l'aberration annuelle des étoiles par MOLYNEUX et son interprétation théorique par BRADLEY en 1728 fournissent une valeur de la vitesse de la lumière dans le vide égale à celle de HUYGENS (l'angle d'aberration est égal au rapport  $v/c$  de la vitesse orbitale  $v$  de la Terre à la vitesse  $c$  de la lumière).

Tout en confirmant la validité de la théorie de RÖMER, la découverte de l'aberration stellaire constitue vraiment la première preuve directe de la réalité du mouvement annuel de la Terre : si, en effet, la Terre était immobile ou en translation uniforme par rapport aux étoiles, l'aberration n'existerait pas (l'aberration séculaire correspondant à la translation uniforme du système solaire par rapport aux étoiles n'est pas observable). Il faut cependant noter que la validité de cette preuve est liée à celle de la théorie newtonienne de la lumière (flux de particules) sur laquelle s'appuyait BRADLEY.

La mise en évidence, entre 1824 et 1836, de la parallaxe annuelle des étoiles par STRUVE, BESSEL et HENDERSON, auparavant masquée par l'aberration, constitue une preuve plus directe du mouvement annuel de la Terre, recherchée en vain par COPERNIC et TYCHO-BRAHÉ.

Enfin la mesure de la vitesse de la lumière en laboratoire par FIZEAU puis FOUCAULT vers 1850 confirme les résultats de RÖMER et BRADLEY. En même temps elle prouve que la lumière est de nature ondulatoire.

L'effet DOPPLER-FIZEAU permet lui aussi de prouver directement la translation de la Terre. En observant par spectroscopie, à six mois d'intervalle, une étoile située dans le

plan de l'écliptique et en quadrature avec le Soleil, on peut mesurer directement la vitesse orbitale  $v$  de la Terre, la variation relative de longueur d'onde ayant pour expression :  $d\lambda/\lambda = 2 v/c$ .

Contrairement au mouvement diurne, le caractère absolu du mouvement annuel de la Terre ne peut être mis en évidence par une expérience mécanique « terrestre », c'est-à-dire effectuée sans observer le ciel. Ce mouvement est en effet assimilable à un mouvement rectiligne uniforme pendant la durée d'une expérience de laboratoire, car les forces d'inertie correspondantes compensent presque totalement les forces gravitationnelles responsables du mouvement annuel (c'est en ce sens qu'on parle du mouvement de « translation » de la Terre) [14]. Deux expériences identiques de mécanique, effectuées à six mois d'intervalle, donnent le même résultat.

### **2.3. Une mise en évidence du mouvement de translation de la Terre par une expérience d'optique est-elle possible ?**

Dans le modèle de l'optique ondulatoire de YOUNG et FRESNEL, l'existence de l'aberration stellaire implique la fixité de l'éther, support des ondes lumineuses, par rapport aux étoiles, et donc la possibilité de mesurer la vitesse de la Terre par rapport à l'éther (compte tenu des résultats convergents de RÖMER, BRADLEY et FIZEAU, il est admis que la vitesse de la lumière ne dépend pas de la vitesse de la source lumineuse).

Pour mettre en évidence le mouvement de translation de la Terre, ARAGO cherche, en 1809, à détecter une variation de la distance focale d'un télescope pointé vers des étoiles de directions différentes. Ce résultat négatif est interprété par FRESNEL. Selon sa théorie, l'éther est entraîné partiellement par un corps en mouvement, le coefficient d'entraînement étant égal à  $1 - 1/n^2$  où  $n$  est l'indice de réfraction du corps. En étudiant la vitesse de la lumière dans un courant d'eau, FIZEAU vérifie en 1851 la valeur de ce coefficient (l'expérience sera répétée en 1886 par MICHELSON et MORLEY avec une plus grande précision, et en 1919 en remplaçant l'eau par le quartz).

Par la suite AIRY, en 1871, ne peut détecter une variation de la direction d'une étoile quand il remplit d'eau un télescope. HOEK (1868), MAXWELL (1868) puis MASCART et JAMIN (1874) ne peuvent mettre en évidence le mouvement de la Terre en étudiant la propagation de la lumière dans des milieux transparents. Ces résultats sont conformes à la théorie de FRESNEL, la valeur du coefficient d'entraînement de l'éther faisant, comme le montrent MASCART, POTIER et VELTMANN, que la Terre apparaît comme immobile par rapport à l'éther [15] : au premier ordre en  $v/c$ , l'entraînement de FRESNEL compense le vent d'éther.

Sur une idée de MAXWELL, MICHELSON en 1881, puis MICHELSON et MORLEY en 1887 [16], réalisent une expérience célèbre dans laquelle ils comparent le temps mis par la lumière pour parcourir deux distances égales, l'une parallèle et l'autre perpendiculaire à la vitesse de la Terre. Contrairement aux expériences précédentes, la lumière ne traverse ici aucun milieu transparent réfringent. À leur tour, quelle que soit l'époque de l'an-

née, ils échouent à mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, en contradiction évidente avec l'existence de l'aberration stellaire.

En 1932, KENNEDY et THORNDIKE [17] modifient l'expérience de MICHELSON dans le but de mettre en évidence le mouvement du Soleil par rapport à l'éther : les deux bras de l'interféromètre sont de longueurs inégales ; l'interféromètre est fixe dans le laboratoire. L'expérience est un échec : aucun déplacement des franges d'interférence ne peut être associé au mouvement annuel.

Diverses autres expériences « terrestres », susceptibles elles aussi de révéler un mouvement de translation de la Terre autour du Soleil par le changement d'orientation d'un appareil physique, ne donnent aucun résultat : RAYLEIGH (1902) sur le pouvoir rotatoire d'un cristal de quartz d'orientation variable et BRACE (1904) sur la double réfraction, TROUTON et NOBLE (1905) puis TOMASCHEK (1925) sur les condensateurs électriques, TROUTON et RANKINE (1908) sur la conductivité électrique, CHASE (1927).

Ainsi, dans les expériences de RAYLEIGH et BRACE, le mouvement de la Terre devait affecter le plan de polarisation d'un rayon réfracté ; dans l'expérience de TROUTON et NOBLE, un condensateur électrique plan chargé, mobile autour d'un axe parallèle à ses armatures, devait s'orienter parallèlement à la vitesse de translation de la Terre. Mais ces effets ne sont pas observés [18-19].

Finalement EINSTEIN montre qu'une mise en évidence du mouvement annuel de la Terre est impossible par une expérience optique de laboratoire car les équations de MAXWELL satisfont le principe de relativité suivant lequel on ne peut détecter un mouvement absolu de translation uniforme (MICHELSON a cependant suggéré qu'une expérience analogue à celle de MICHELSON et GALE permettrait de mettre en évidence le mouvement annuel de la Terre).

## CONCLUSION

Si le mouvement de rotation de la Terre par rapport aux étoiles fixes est une observation astronomique immédiate, son caractère absolu n'a pu être prouvé, sur la base de la mécanique classique, que par des observations ou expériences terrestres (on peut certes observer une aberration diurne des étoiles, environ soixante-cinq fois plus faible que l'aberration annuelle, mais le phénomène ne fait que confirmer l'existence du mouvement relatif de la Terre et des étoiles).

Ce sont au contraire des observations astronomiques délicates (aberration et parallaxe des étoiles) qui ont mis directement en évidence le mouvement annuel relatif de la Terre et des étoiles fixes, mais le caractère absolu du mouvement annuel de la Terre par rapport aux étoiles fixes et au Soleil ne peut être démontré par des expériences de laboratoire puisque les manifestations physiques de ce mouvement absolu sont négligeables au laboratoire et que, par ailleurs, l'hypothèse d'un éther fixe par rapport aux étoiles doit être éliminée.

## REMERCIEMENTS

L'auteur remercie vivement le rapporteur de cet article, dont les commentaires ont permis d'éliminer quelques erreurs et d'enrichir le contenu de l'article.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BEAUBOIS F. Retour sur le système héliocentrique. *Bull. Un. Phys.*, mars 2001, vol. 95, n° 832, p. 601-608.
- [2] ACLOQUE P. Histoire des expériences pour la mise en évidence du mouvement de la Terre. *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, 1982, 4.
- [3] GAPAILLARD J. Le mouvement de la Terre. La détection de sa rotation par la chute des corps. *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, 1988, 25.  
Voir aussi J. GAPAILLARD. *Et pourtant elle tourne*. Paris : Seuil, 1993.
- [4] INGLIS S. J. *Physics : an ebb and flow of ideas*. New York : John Wiley, 1970.
- [5] SIVARDIÈRE J. Histoire de la découverte du système solaire : I. Géométrie et cinématique. *Bull. Un. Phys.*, avril 1995, vol. 89, n° 773, p. 645-661 et *La Symétrie en mathématiques, physique et chimie*, chapitre 37, Presses Universitaires de Grenoble, Collection Grenoble Sciences, 1995.  
Voir aussi GENTY R. L'effet « Laplace ». *Bull. Un. Phys.*, mars 1996, vol. 90, n° 782, p. 455-469 ainsi que BELORIZKY E. et SIVARDIÈRE J. La déviation horizontale de la chute des corps : peut-on mesurer une déviation vers le Sud ? *Bull. Un. Phys.*, janvier 2001, vol. 95, n° 830 (2), p. 15-20.
- [6] BERGET A. *Le ciel*. Paris : Larousse, 1923.
- [7] SMITH R. L. Les remontées d'eau profonde, source de vie des océans. *La Recherche*, octobre 1978, 93, 855.  
Voir aussi CRÉPON M. et CASTAGNÉ J. Quelques caractéristiques des mouvements océaniques à moyenne et grande échelle. *Bull. Un. Phys.*, mars 1986, vol. 80, n° 682, p. 617-643.
- [8] COMPTON A. H. A laboratory method of demonstrating the Earth's rotation. *Science*, 1913, 37, p. 803-806 (1913) ; A determination of latitude, azimuth and the length of a day independent of astronomical observation. *Phys. Rev.*, 1915, 5, p. 109-117, *Popular Astronomy*, 1915, 23, p. 199-207 et *Scientific American suppl.*, 1915, n° 2047, p. 196-197.  
Voir aussi STOMMEL H. M. et MOORE D. W. *An introduction to the Coriolis force*. New York : Columbia University Press, 1989.
- [9] PANTALONI J., CERISIER P., BAILLEUX R. et GERBAUD C. Convection de Bénard-Marangoni : un pendule de Foucault. *J. de Physique*, 1981, 42, L147-150.
- [10] KOESTER L. Neutron physics. *Springer tracts in physics*, 1977, 80.
- [11] SHAPIRO A. H. Bath-tub vortex. *Nature*, 1962, 196, 1080.  
Voir aussi HANNEKEN J. W. Coriolis myths and draining bathtubs. *Am. J. Phys.*, 1994, 62, 1063 et les deux articles suivants.

- [12] AVENEL O. et VAROQUAUX E. Detection of the Earth rotation with a superfluid double-hole resonator. *Czech. J. Phys.*, 1996, (Suppl S6) 48, p. 3319-3320.  
SCHWAB K., BRUCKNER N. et PACKARD R. E. Detection of the Earth's rotation using superfluid phase coherence. *Nature*, 10 avril 1997, 386, p. 585-587 (voir aussi l'article de EVERITT C. page 551).
- [13] Voir MICHELSON A. A., GALE H. G. et PEARSON F. The effect of Earth's rotation on the velocity of light. *Astrophys. J.*, 1925, 61, p. 140-145.  
Cette expérience est décrite par SOMMERFELD A. *Lectures on theoretical physics*. vol. IV Optics, New York : Academic Press, 1954 et par MEYER-ARENDT J. R. *Introduction to classical and modern optics*. Londres : Prentice-Hall, 1972. Les expériences de Harress (1912) et de Sagnac et Pogany (1913) sont les analogues de l'expérience préliminaire de Foucault. Plus récemment, le principe de l'expérience de Michelson-Gale-Pearson a été appliqué aux faisceaux neutroniques, voir : WERNER S. A., STAUDEMANN J. L. et COLLELA R. Effect of Earth rotation on the quantum mechanical phase of the neutron. *Phys. Rev. Letters*, 1979, 42, p. 1103-1106 et KLEIN A. G. et WERNER S. A. Neutron Optics. *Rep. Prog. Phys.*, 1983, 46, p. 259-335.
- [14] Bien entendu ces forces d'inertie ne sont pas négligeables. Si elles étaient nulles, la période des marées serait de 24 heures et l'amplitude des marées serait énorme, de l'ordre de 1000 mètres, et non de l'ordre de 50 centimètres : voir SANTAVY I. Inertial reference frames and gravitational forces. *Eur. J. Phys.*, 1981, 2, p. 220-224.
- [15] FRENCH A. P. *Special relativity, The MIT introductory physics series*. New York : Norton, 1968.
- [16] L'expérience de Michelson et Morley a été répétée avec une très grande précision par Joos en 1930, et plus récemment : voir BRILLET A. et HALL J. L., *Phys. Rev. Lett.*, 1979, 42, p. 549.
- [17] KENNEDY R. J. et THORNDIKE E. M. *Phys. Rev.*, 1932, 42, p. 400.
- [18] Voir PANAVSKY W. et PHILLIPS M. Classical electricity and magnetism, Addison-Wesley, Reading, 1962 et SIMON Y. *Relativité restreinte*, Coll. Du cours aux applications, Paris : Armand Colin, 1971. En 1911, Laue a donné une interprétation précise du paradoxe de Trouton et Noble dans le cadre de la relativité restreinte.
- [19] De nouvelles expériences exploitant respectivement l'effet Mössbauer et l'effet maser ont été réalisées par Cedarholm en 1958 et Champeney en 1963 pour détecter le mouvement de translation de la Terre. Ces expériences, dont le résultat a été négatif, sont décrites par JACKSON J. D. *Classical electrodynamics*. New York : John Wiley, 1975.



**Jean SIVARDIÈRE**, aujourd'hui retraité, a été physicien au Département de Recherche Fondamentale en Matière Condensée du CEA-Grenoble et a enseigné à l'Université Joseph Fourier de Grenoble.