

Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique: II- mouvements de Terre

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

Résumé: Dans ce cours, nous montrons comment la loi d'inertie de Galilée a jeté les bases d'une compréhension des deux mouvements principaux de la Terre : sa rotation et sa révolution autour du Soleil. Puis nous verrons comment les preuves de ces mouvements ont été données. Une expérience simple de visualisation est proposée qui permet de représenter les phénomènes observés.

Mots-clefs : COURS - LOI - TERRE - SOLEIL - REALISATION

Introduction

On dit que le rire est le propre de l'homme. Je crois qu'il y a une caractéristique encore plus spécifique de l'intelligence humaine ; c'est la curiosité. Quand l'homme observe un phénomène, il cherche à en comprendre l'origine (ceci n'interdit pas de le faire en s'amusant).

Lors du premier cours nous avons rencontré plusieurs phénomènes que les premiers hommes ont observés : les levers et les couchers du Soleil qui se produisent chaque jour dans une direction un peu différente de la veille, selon un cycle régulier. Le Soleil qui, selon les saisons, monte plus ou moins haut dans le ciel et nous éclaire plus ou moins longtemps. Les étoiles qui se décalent par rapport au Soleil (rappelez-vous les levers héliaques !). Nous allons commencer par analyser ces quelques phénomènes. Je suis sûr que vous aurez envie de les expliquer aux enfants après les avoir compris.

Que manquait-il aux observateurs anciens pour interpréter correctement ces observations, apparemment si simples ? Saurions nous reconstituer la formidable démarche intellectuelle ?

Forme et dimension de la Terre

C'est par là qu'il faut commencer. Les Astronomes grecs avaient imaginé déjà que la Terre était ronde. La contemplation du Soleil ou de la Lune pouvait suggérer que les corps célestes étaient sphériques. Mais les astronomes surent donner quelques bonnes raisons : par exemple, quand la Lune passe dans l'ombre de la

Terre, le bord de l'ombre apparaît comme un arc de cercle. L'expérience des marins a dû jouer un rôle important. Il m'est arrivé d'observer un bateau à l'horizon et de ne voir que le haut de sa structure. Si la Terre avait été plate j'aurais vu tout le bateau.

Quel est le rayon de la sphère terrestre ? Pour répondre à cette question demandons nous à quelle distance de nous se trouve la ligne d'horizon que l'on voit d'une hauteur donnée ? Le petit encadré ci-après vous montre comment faire le calcul et donne une application numérique.

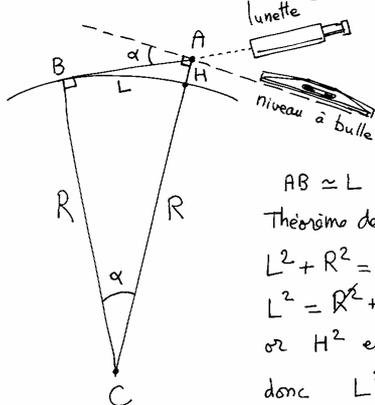
Le rayon de la Terre est d'environ 6400 km. Les premières déterminations remontent à Eratosthène. Allez voir le courrier des lecteurs, il en est question.

La loi d'inertie de Galilée

La Nature obéit à des lois. Ce n'est que très lentement que l'homme en a pris conscience. Ce n'était pas une tâche facile car Dame Nature semble prendre un malin plaisir à nous faire croire ce qui n'est pas. Ainsi, sur Terre, vous devez produire une force pour déplacer un objet. Par exemple, il faut pousser un chariot pour le faire avancer. Pouvait-on imaginer que cette "loi" soit fausse ? C'était d'une telle évidence que tout homme de bon sens devait être prêt à jurer qu'une force était nécessaire pour entretenir un mouvement. Le physicien, R. Feynman rappelle dans un de ses cours qu'une théorie ancienne disait que les planètes tournaient, parce que "derrière elles il y avait des anges invisibles battant de leurs ailes et poussant les planètes". Nous allons voir que la réalité est un peu différente.

Encadré 1: Le rayon R de la Terre.

Un calcul simple montre que l'horizon vu depuis une hauteur H est à une distance L , telle que: $L^2 \approx 2RH$



$AB \approx L$
Théorème de Pythagore dans ABC
 $L^2 + R^2 = (R+H)^2$
 $L^2 = R^2 + H^2 + 2RH - R^2$
or H^2 est très petit devant $2RH$
donc $L^2 \approx 2RH$

L'angle α est mesurable, avec une lunette et un niveau à bulle. Or on a¹: $L = R\alpha$, d'où le rayon de la Terre:

$$R = \frac{2H}{\alpha^2}$$

Dans ces relations α est mesuré en radians (rappel: $180^\circ = \pi$ radians). Une expérience, faite à Brest par les élèves de l'Ecole Navale², donne $\alpha = 0,27^\circ$ pour $H = 75$ mètres. L'application numérique conduit à:

$$R = \frac{2 \times 75}{[0,27 \times (3,1416/180)]^2} = 6\,755\,000 \text{ mètres}$$

Revenons à notre chariot. Si je graisse les moyeux du chariot et si j'aplanis la route, l'expérience montre que la force nécessaire est plus faible³. Une loi universelle dépend-elle de la lubrification et de la qualité de la chaussée ? Non pas. Si j'imagine un chariot presque parfait il pourra après une brève impulsion garder longtemps son mouvement. Un chariot parfait restera perpétuellement en mouvement. Il fallait faire abstraction des frottements inhérents à tous les déplacements habituels pour découvrir cette loi magnifique, la loi d'inertie, qui dit qu'un corps, en l'absence de toute perturbation extérieure, garde son mouvement rectiligne indéfiniment. C'est Galilée qui eut cette perspicacité. Je crois que c'est cette loi qui manquait pour interpréter les mouvements des astres. Les conséquences de cette loi sont immenses. Nous verrons un peu plus loin qu'une force extérieure peut ralentir, accélérer ou dévier un corps en mouvement mais nous avons déjà compris qu'elle n'est pas nécessaire pour entretenir ce mouvement.

¹ Cette relation est très importante, nous l'utiliserons souvent.

² Selon Maillard et Millet, "Cosmographie", 1952, (Hachette).

³ Cette image est emprunté au petit livre admirable écrit par A. Einstein et L. Infeld: "l'évolution des idées en physique".

Si la Terre se déplace, tous les objets à sa surface suivent ce même mouvement. Ces objets, par rapport à la Terre ne "ressentent" pas le déplacement. Dans son livre "De motu antiquiora", Galilée affirmait que le mouvement est comme rien. Nous ne ressentons pas le mouvement de la Terre. Pourtant sa vitesse est grande. Ne serait-ce que du fait de la rotation de la Terre, nous parcourons à l'équateur un tour (environ 40000 km) en 24 heures, c'est-à-dire que notre vitesse est de 1700 km/h environ, deux fois plus grande que celle des avions de lignes à réaction.

Cette loi d'inertie se manifeste tous les jours de notre vie quotidienne. Prenez par exemple le cas d'un voyageur, circulant dans un train à vitesse constante sur une voie rectiligne. Si le voyageur tient ses clefs à la main, il pourrait affirmer: "c'est ma main qui communique la vitesse aux clefs, ce qui explique qu'elles me suivent et restent dans ma main". Mais Galilée de suggérer: " lâchez vos clefs pour voir ce qui se passe quand votre main cesse d'agir sur les clefs". Effectivement les clefs tombent aux pieds du voyageur. Elles l'ont accompagné dans son déplacement horizontal à grande vitesse. Mais le voyageur réplique que s'il fait la même expérience en se penchant à la fenêtre, les clefs tombent loin en arrière. Ce à quoi Galilée réplique à son tour (après avoir mis en garde notre voyageur: "e pericoloso sporgersi") que c'est le frottement de l'air extérieur qui en est la cause. Pour savoir si Galilée avait raison j'ai fait l'expérience suivante (Figure 1) : à bord d'un ferry j'avais accès à la poupe. Le bateau avançait à grande vitesse mais à l'arrière l'air était entraîné, le bateau jouant le rôle de pare-brise. Il n'y avait plus de frottement. J'ai sacrifié une pièce de monnaie en la lâchant du pont supérieur. La pièce est tombée "aux pieds du bateau" (si j'ose dire), quelques vingt mètres plus bas. Galilée avait raison.

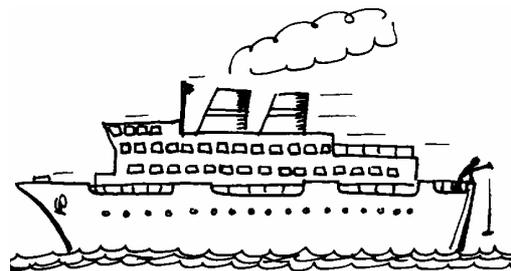


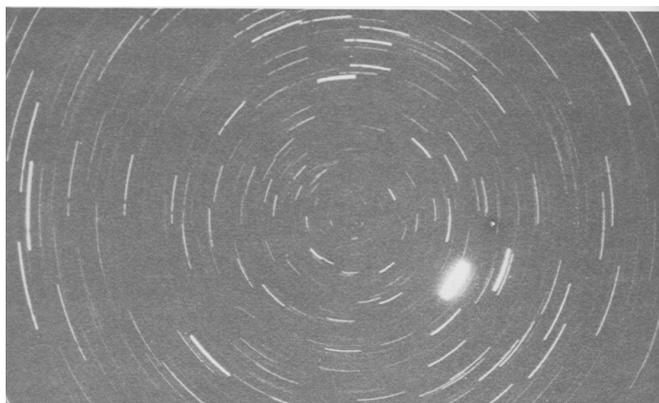
Figure 1. Vérification de la loi d'inertie à bord d'un ferry. La pièce tombe à la verticale du bateau.

Certes la loi d'inertie ne démontre pas que la Terre tourne sur elle-même ou qu'elle tourne autour du Soleil, mais au moins, il n'y a plus d'obstacle à considérer que la Terre puisse se déplacer ou tourner sur elle-même, à notre insu. Nous avons déjà fait un grand pas.

Rotation de la Terre sur elle-même

Nous ne ressentons pas les mouvements uniformes, ou quasi uniformes, comme celui que pourrait engendrer, à sa surface, une rotation de la Terre sur elle-même. Il n'est donc pas facile de mettre en évidence une telle rotation.

Héraclide avait proposé que le mouvement des étoiles au cours d'une nuit (Figure 2) résulte de la rotation de la Terre sur elle-même. Sans cela il fallait considérer que les étoiles lointaines effectuassent un immense cercle autour de nous. Aujourd'hui, sur la base de nos connaissances en physique nous pourrions rejeter cette dernière idée car les étoiles lointaines devraient se déplacer plus vite que la lumière.



(photo CLEA: école d'été de Grasse 1980)

Figure 2: La rotation des étoiles autour d'un pôle terrestre (ici le pôle nord en une heure)

Les observations montrent que la plupart des corps célestes (Soleil, planètes) tournent sur eux-mêmes. La rotation est un phénomène général. Pourquoi la Terre devrait-elle échapper à la règle ?

Plus tard il y eut aussi la mesure de la forme de la Terre. Ces mesures laborieuses, faites par des moyens divers, montrèrent que la Terre n'était pas une sphère parfaite mais qu'elle était aplatie, comme une rotation pouvait le provoquer. Plusieurs indices furent accumulés : tout d'abord Richer, envoyé à Cayenne entre 1671 et 1673 pour participer à la mesure de la distance Terre Mars, constata que la période d'oscillation d'un même pendule y était plus grande qu'à Paris. Cette mesure fut interprétée plus tard comme résultant de la plus faible attraction effective à l'équateur (Cayenne est à 5° au nord de l'équateur), résultant de la plus grande distance au centre et de l'accélération centrifuge. Mais surtout, la mesure

directe d'un même arc, en Equateur⁴, par de La Condamine & Bouguer et, en Laponie, par Maupertuis & Clairaut, montra de manière irréfutable que la Terre est renflée à l'équateur. Ces mesures furent d'une extrême difficulté. Par triangulation géodésique il fallait mesurer une longueur de l'ordre de 330 kilomètres (environ 3 degrés en latitude), avec une précision de l'ordre de quelques mètres. Le rayon de la Terre est de 6378 km à l'équateur et 6357 km aux pôles. La Terre forme en fait un ellipsoïde.

Il y eut enfin la preuve donnée directement par le pendule de Foucault. Nous ne répéterons pas les explications que nous avons données dans un article précédent (2003, CC101, p17). Rappelons simplement que quand le pendule oscille librement, par exemple au pôle Nord, nulle force n'agit sur lui pour faire changer sa direction d'oscillation. Pourtant ce plan tourne lentement (Figure 3), preuve que c'est le support (en l'occurrence la Terre) qui tourne. Il a quand même fallu attendre le 19ème siècle pour avoir la preuve manifeste de la rotation de la Terre sur elle-même. Mais pourtant elle tourne !

La conclusion est que le mouvement diurne des astres est un mouvement apparent. C'est la Terre qui tourne sur elle-même.

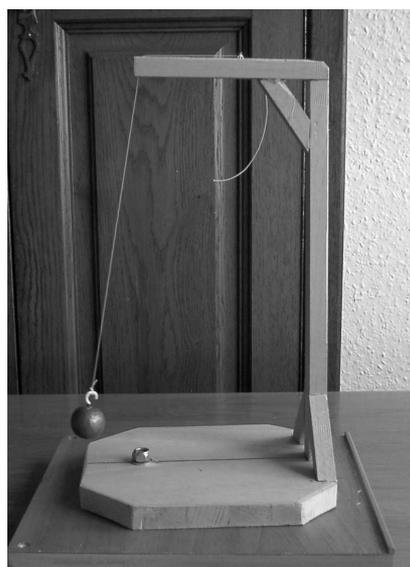


Figure 3: Un pendule monté sur une platine tournante permet de comprendre le principe du pendule de Foucault de manière saisissante. Quand la platine tourne, le pendule oscille toujours dans la même direction. Une personne placée sur la platine penserait que c'est le plan d'oscillation qui tourne.

⁴ Citons le livre remarquable de Florence Trystram: le procès des étoiles, paru aux éditions Seghers. Ce livre raconte de manière captivante les aventures incroyables des scientifiques de l'expédition de La Condamine & Bouguer en Equateur de 1735 à 1744.

Révolution de la Terre autour du Soleil

Posons-nous donc la question importante : Est-ce la Terre qui tourne autour du Soleil ou le Soleil qui tourne autour de la Terre ? Cette question a occupé les hommes pendant plusieurs siècles. Je vais peut-être vous surprendre en donnant de suite la réponse : ce n'est ni l'un, ni l'autre ! Comment est-on arrivé à ce résultat surprenant ? Nous l'expliquerons dans le prochain cours après avoir parlé de la dynamique de Newton. Pour l'instant nous allons nous borner à expliquer comment on est arrivé à montrer que c'est, approximativement, la Terre qui tourne autour du Soleil.⁵

Aristarque de Samos émit l'idée, 280 ans avant J.-C., que la Terre tournait autour du Soleil (cf. l'article de P. Lerich dans ce même Cahier). Aristarque affirma même que le Soleil était plus gros que le Péloponnèse, ce qui lui valut l'exil. Il a fallu attendre Copernic (1530) pour retrouver cette belle idée, sans plus de preuves que la simplification de la représentation. Aristote (300 ans avant J.C.) donnait un argument très scientifique contre l'hypothèse de la révolution de la Terre autour du Soleil : quand un observateur se déplace avec la Terre, il change de point de visée. Les étoiles doivent donc apparaître à des positions différentes : quand vous marchez dans une forêt, les arbres semblent se déplacer les uns par rapport aux autres. On appelle cela un effet de parallaxe. Nous y reviendrons car c'est un effet que l'on mettra à profit pour obtenir la distance des étoiles. Or les étoiles semblaient toujours à la même place. Aristote ignorait que les étoiles sont si distantes, que l'effet n'est pas mesurable à l'œil nu. Pour l'étoile la plus proche du Soleil (Proxima du Centaure) l'effet est inférieur à 1/4000 degré. Même aujourd'hui, la mesure n'est pas facile.

La première preuve vint avec Galilée et l'observation des planètes. A l'époque les deux visions s'affrontaient : Terre ou Soleil immobile au centre de l'Univers. Les planètes tournaient-elles autour du Soleil ou de la Terre ? Quand Galilée pointa sa lunette vers Vénus il constata que la planète apparaissait parfois en croissant, comme la Lune. En revanche Mars était toujours complètement éclairé. De plus, Vénus, dite l'étoile du berger parce qu'elle est visible à l'aube ou au crépuscule, ne s'écartait jamais de plus de 46 degrés du Soleil. Tous ces faits s'accordent mieux avec le modèle

⁵ Pour les impatientes, expliquons de suite que la Terre et le Soleil tournent autour du centre de gravité commun, situé très près du centre du Soleil. Nous verrons aussi que la définition d'un mouvement ne peut se faire que par rapport à un "référentiel".

qui place le Soleil au centre et qui suppose que la Terre tourne autour avec les autres planètes.

Même si tous les astronomes étaient déjà convaincus que la Terre tournait autour du Soleil, une preuve plus formelle vint en 1726. Bradley observa que les étoiles se déplaçaient sur de petites ellipses au cours d'une année. Ces ellipses, avaient toutes un demi grand axe de 0,0055 degré. Était-ce le phénomène dont l'absence permettait à Aristote d'affirmer que la Terre était immobile ? Est-ce que cela signifiait alors que toutes les étoiles étaient à la même distance de nous, sur une "sphère des fixes" ? Non, le phénomène n'est pas dû à la parallaxe, bien trop faible. Eh puis ! Quand cela serait, faudrait-il ressusciter la sphère des fixes avec ses étoiles toutes à la même distance ? Impensable ! Quelle que soit l'interprétation, on ne pouvait plus imaginer la Terre immobile. Galilée a prouvé que rien n'interdisait que la Terre se meuve, Bradley a prouvé qu'elle se mouvait.

Le nouveau phénomène est ce qu'on appelle *l'aberration de la lumière*. La lumière nous arrive d'une étoile à 300 000 km/s. Si la Terre se déplace, la combinaison des vitesses produit une inclinaison apparente de la direction des rayons lumineux : quand vous courez sous une pluie verticale vous devez incliner votre parapluie. La faible inclinaison est proportionnelle au rapport des vitesses (voir l'encadré 2).

Encadré 2: L'aberration de la lumière. La preuve formelle de la révolution de la Terre autour du Soleil.

Quand le déplacement de la Terre est perpendiculaire à la ligne de visée d'une étoile, la composition des vitesses incline la ligne de visée dans le rapport des vitesses. Or, toutes les étoiles connaissent cet effet, preuve que la Terre, dans son déplacement, balaie toutes les directions possibles, c'est-à-dire qu'elle suit une orbite fermée.

Quand la vitesse de la lumière et la distance Terre Soleil seront connues, les astronomes auront la preuve formelle du mouvement orbital de la Terre autour du Soleil, car la vitesse orbitale (30 km/s) déduite sera en accord parfait avec l'angle d'aberration mesuré :

$$\text{angle} = \frac{180}{3,1416} \cdot \frac{30}{300000} = 0,0057 \text{ degré.}$$

Plus tard encore, l'observation des petites ellipses de parallaxes, celles qu'aurait aimé voir Aristote, confirma de manière encore plus formelle que c'était bien la Terre qui tournait autour du Soleil.

Visualisation de ces mouvements

Quels effets produisent sur l'observation quotidienne les deux mouvements que nous venons de voir : la rotation de la Terre sur elle-même et sa révolution autour du Soleil ? Nous allons donner un moyen simple pour visualiser ce système compliqué.

La Terre tourne d'ouest en est. Donc, un observateur qui considère son propre point de vue, voit le ciel tourner autour du même axe mais en sens contraire (d'est en ouest). Notons que, du fait de l'inertie, cette direction est immuable (du moins en négligeant la précession qui fait décrire un cône à cet axe, en 26 000 ans).

De même, la Terre se déplace autour du Soleil en restant dans un plan qui, par inertie également, demeure immuable dans l'espace. Ce plan est très important. On l'appelle, *l'écliptique*. Donnons un fait d'observation que nous n'avons pas mentionné. L'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique. Il fait un petit angle de $23,5^\circ$ environ (Fig. 5).

Alors construisons le petit système décrit ci-dessous. Il permettra de comprendre les observations. Prenons un ballon de chimie, rempli à moitié d'eau teintée. Ce ballon matérialisera le ciel, la surface de l'eau sera l'horizon de l'observateur, l'axe du goulot nous donnera l'axe de rotation "du ciel".



Figure 5: Un ballon de chimie pour comprendre le ciel. La surface du ballon représente le ciel. L'horizon de l'observateur est donné par la surface du liquide.

Quand je suis à un pôle, mon horizon est perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre. Pour obtenir cela je dois tenir le ballon verticalement (à l'envers ou à l'endroit). J'en profite pour placer un ruban de papier pour matérialiser l'équateur.

Je place ensuite un ruban (ici un ruban plus clair) pour matérialiser l'écliptique sur lequel le Soleil se déplacera lentement tout au long de l'année. L'angle de ces deux plans est de $23,5^\circ$. Remarquons que l'axe

du ballon est fixe par rapport à l'écliptique et à l'équateur, comme nous le disions. Inclignons l'axe du ballon à 45° par rapport au plan de l'horizon. On aura ainsi la position qui correspond à la France. Cet angle s'appelle la latitude du lieu considéré. Repérons mentalement par rapport au socle : le nord, le sud, l'est et l'ouest dans le plan horizontal (surface de l'eau). Nous pourrions par exemple les tracer sur la planchette support.

Il ne nous reste plus qu'à prendre une gomme pour matérialiser la position du Soleil, un jour de l'année. Plaçons le Soleil sur un point quelconque de l'écliptique et faisons tourner le ballon autour de son axe, d'est en ouest. Nous verrons le Soleil se lever à l'horizon, à peu près vers l'est, et, après un demi-tour repasser sous l'horizon, à peu près vers l'ouest. Nous pouvons expérimenter plusieurs positions du Soleil. Quand il est aux intersections des deux bandes, il se lève exactement à l'est et se couche exactement à l'ouest. Il décrit le même arc au-dessus et au-dessous de l'horizon. Ce sont les équinoxes ; nuits et jours ont la même durée.

Plaçons le Soleil sur l'une des positions de l'écliptique, la plus écartée possible de l'équateur : Sur l'une (celle de la Figure 5) nous voyons le Soleil se lever au nord-est, monter très haut sur l'horizon et se coucher au nord-ouest en restant longtemps au-dessus de l'horizon. Les nuits sont courtes. Le Soleil chauffe longtemps et ses rayons sont presque perpendiculaires au sol. Il fait chaud. C'est le Solstice d'été. Sur l'autre, diamétralement opposée à la première, nous voyons le Soleil se lever au sud-est, monter peu dans le ciel et se recoucher très vite au sud-ouest. C'est le solstice d'hiver, avec ses nuits longues et son Soleil rasant.

Vous pouvez expérimenter ce qui se passe au pôle nord par exemple en plaçant le ballon verticalement. Vous verrez que le Soleil reste toujours au-dessus ou au-dessous de l'horizon (confondu avec l'équateur, d'ailleurs). Ce sont les longues nuits ou les journées polaires.

Vous pouvez vous mettre à l'équateur (axe horizontal). Les nuits ont la même durée que les jours, toute l'année. On n'est pas à l'équateur pour rien !

Noter qu'à l'équateur le Soleil se couche en suivant une trajectoire bien perpendiculaire à l'horizon. La nuit y tombe très vite, contrairement à ce qui se passe chez nous. Prenez le temps de jouer au ballon !

Lectures :

Pour en savoir plus, consultez le livre de P. Causeret et L. Sarrazin : "Les saisons et les mouvements de la Terre", aux éditions Belin - Pour la Science.

Le livre est magnifiquement illustré et les schémas sont d'une grande clarté.