

ARTICLE DE FOND

La Terre tourne-t-elle encore rond ?

Forme, rotation et structure de la Terre

Christian Larcher, Le Perreux, larcher2@wanadoo.fr

Introduction

Les mouvements principaux de la Terre, sa rotation sur elle-même et sa révolution autour du Soleil présentent une grande importance pour tous les êtres vivants à sa surface. Ces mouvements sont en effet à l'origine des saisons et à l'origine du concept de temps avec les unités de base que sont le jour et l'année. Dans les dernières décennies, l'utilisation de méthodes extrêmement précises ont mis en évidence des irrégularités de mouvement, particulièrement pour la rotation de la Terre. L'étude fine de ces irrégularités est précieuse car elles véhiculent de nombreuses informations sur la structure interne de notre globe.

Nous allons ici rappeler l'histoire de la découverte progressive de la forme de notre planète, des irrégularités de sa rotation sur elle-même et les explications proposées pour en rendre compte. Nous détaillerons dans un prochain article les liens entre ces mouvements et la structure interne de la Terre.

La forme de la Terre

1. Une Terre sphérique ?

L'idée d'une Terre sphérique apparaît avec Parménide (515-450 av JC) sur des critères plus esthétiques que rationnels. La mesure de son rayon fut établie plus tard en utilisant la célèbre méthode inventée par Ératosthène (284-192 av JC).

Il faut attendre le XVII^e siècle pour obtenir des mesures plus précises. Elles sont dues surtout à l'abbé Picard (1620-1682) qui, en utilisant une méthode de triangulation géodésique, évalue la longueur d'un degré de méridien à 57 060 toises soit environ 111 km.

2 Tomate ou citron ?

A la fin du XVII^e siècle plusieurs physiciens se demandent si la Terre est vraiment sphérique. **Huygens** (1629-1695) découvre l'existence de la force centrifuge qui résulte de la rotation terrestre. Cette force est nulle aux pôles et maximale à l'équateur ; elle agit différemment suivant la latitude. Ne peut-elle pas avoir un effet sur la forme de la Terre ?

En 1687, Isaac Newton pense que si la Terre ne tournait pas sur elle-même, elle serait parfaitement sphérique à *cause de l'égalité de ses parties*. Mais du fait de sa rotation, elle a une forme ellipsoïdale. Newton ajoute que ceci impose que la Terre solide ait été fluide à un moment donné de son histoire.

Newton cherche à calculer l'aplatissement de la Terre en la supposant fluide et homogène et en utilisant sa théorie de l'attraction universelle en $1/r^2$. Pour effectuer ce calcul, il considère que deux colonnes fluides partant l'une du pôle et l'autre de l'équateur et se rejoignant au centre de la Terre doivent se faire équilibre. Il est amené pour cela à calculer l'attraction au pôle et à l'équateur d'un ellipsoïde de révolution, c'est la première fois que l'attraction d'un corps non-sphérique est calculée. Il trouve avec son modèle un aplatissement de $1/230$.

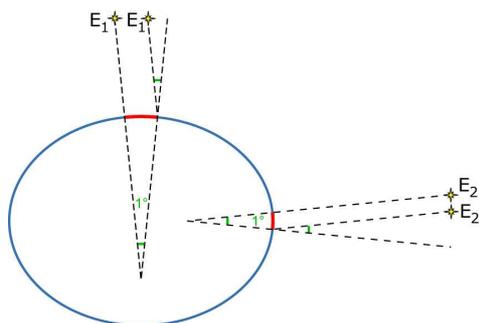
De son côté, en France, J.D.Cassini (Cassini II) poursuit les travaux de Picard. Les résultats de ses mesures le conduisent à estimer que pour une différence de 1° de latitude, mesuré à l'aide des étoiles sur le méridien, on obtient dans le Sud de la France une **portion de méridien plus grande que dans le nord**. Il en conclut que la Terre doit être allongée selon la ligne des pôles.

En d'autres termes pour J.D. Cassini la Terre doit ressembler à un citron. Tandis que, pour les théoriciens comme Huygens et surtout Newton, elle serait plutôt aplatie aux pôles c'est à dire qu'elle aurait plutôt la forme d'une tomate.

Pour trancher le débat entre les "newtoniens" et les "cassiniens", l'Académie des Sciences décide d'envoyer deux expéditions l'une vers le pôle nord et l'autre vers l'équateur. Celle qui part vers le nord effectue des mesures en Laponie en 1736 et 1737, elle comprend entre autres Maupertuis (1701-1774) et A. Clairaut (1713-1765). Elle revient rapidement avec des résultats non équivoques : un arc d'un degré de méridien **est plus long près du pôle nord** qu'en France.

Les verticales sont les normales (perpendiculaires) à l'ellipse et ne concourent pas au centre de la Terre. La longueur d'un arc d'ellipse de faible amplitude est sensiblement égale à celle de l'arc

de cercle dont le centre est le centre de courbure de l'arc.



"Si donc la surface de la Terre est inégalement courbe dans différentes régions, pour trouver la même différence de hauteur dans une étoile, il faudra, dans ces différentes régions, parcourir des arcs inégaux du méridien de la Terre; et ces arcs dont l'amplitude sera toujours d'un degré, seront plus longs là où la Terre sera plus plate. Si la Terre est aplatie vers les pôles, un degré du méridien terrestre sera plus long, vers les pôles que vers l'équateur ; et l'on pourra juger ainsi de la figure de la Terre, en comparant ses différents degrés les uns avec les autres." Maupertuis, 1738 ; le voyage en Laponie

L'autre expédition va vers l'équateur, au Pérou, de 1735 à 1744 elle comprend en particulier La Condamine (1701-1774). Cette équipe rencontre de multiples difficultés dans les Andes et ne reviendra que bien plus tard... (voir le roman "Le procès des étoiles" de Florence Trystam)

En définitive la thèse de Newton se trouve confirmée : la Terre est aplatie aux pôles. Voltaire commente cet événement en quelques vers : "Vous avez confirmé dans ces lieux plein d'ennui Ce que Newton connut sans sortir de chez lui" (4^e discours sur l'homme : de la Modération).

Ce fait étant établi, la différence de rayon entre équateur et pôle est de 22 km, il reste à l'expliquer. De plus, la Terre a-t-elle exactement la même figure que celle que prendrait une masse fluide ? La réponse est importante pour déterminer (le croit-on à l'époque) les conditions qui régnaient à l'origine de la Terre.

A. Clairaut (1713-1765) imagine avec d'autres physiciens que la Terre a probablement connu une période fluide et qu'il convient d'appliquer les lois de l'hydrostatique. Il écrit, dans *Théorie de la figure de la Terre, tirée des principes de l'hydrostatique*, 1743 ; 2^{de} éd. Paris, Courcier, 1808, p. vii. : "...que la figure de la Terre doit dépendre des lois de l'hydrostatique, et que les opérations faites pour la mesurer doivent donner à peu près les mêmes résultats que si on les faisait sur une

masse d'eau qui se serait durcie après avoir pris la figure que demande l'équilibre". Il indique que l'aplatissement de la Terre ne dépend pas seulement de sa vitesse de rotation mais également de la répartition interne des masses.

Par ailleurs, A. Clairaut est l'un des premiers à penser que les petites variations de période d'un pendule simple en différents points de la Terre peuvent donner des informations sur son aplatissement. Il donne ainsi naissance à la "géodésie dynamique".

3 De la forme réelle à sa modélisation

Au début du XIX^e siècle on distingue la surface réelle de la Terre ou surface topographique, (celle sur laquelle nous nous déplaçons) et la surface théorique définie de telle sorte qu'en tout point de cette surface le champ de pesanteur lui soit orthogonal tout en restant proche de la surface topographique. Cette surface est définie comme si la Terre était entièrement fluide. Dans le langage moderne on dirait qu'il s'agit d'une surface équipotentielle. Par la suite elle prendra le nom de géoïde. Une telle approche à partir du champ de pesanteur concerne principalement les physiciens. Les mathématiciens, avec Gauss (1777-1873), choisissent une surface mathématique simple, un ellipsoïde de révolution, qui permet d'effectuer facilement des calculs tout en restant proche du géoïde par la forme et par les dimensions.

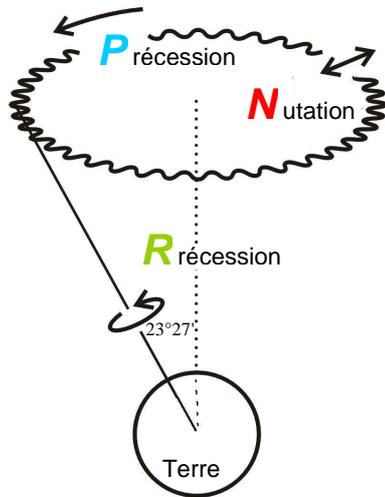
Les mouvements de notre planète

1. Les différents types de mouvement

Les mouvements de l'axe de rotation vus de l'extérieur de la Terre

Dès l'antiquité Hipparque de Nicée avait réussi à montrer que la Terre tourne comme une toupie. L'axe de rotation de la Terre décrit très lentement (par rapport aux étoiles) un cône de 23,5 ° en 25 770 ans autour d'un axe perpendiculaire à l'écliptique (voir figure). Cette faible variation représente environ 50 secondes d'arc par an ; elle explique le phénomène dit de *précession des équinoxes*. Actuellement l'axe de rotation de la Terre passe à moins de un degré de l'étoile polaire. Dans 13 000 ans, l'étoile Véga de la Lyre sera la nouvelle étoile Polaire. Ce mouvement de **précession** de l'axe de rotation a été expliqué par Newton : il résulte de la forme ellipsoïdale de la Terre. L'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil crée un couple de forces sur le bourrelet équatorial de la Terre. Ce couple tend à faire basculer son axe de rotation pour l'aligner perpendiculairement à l'écliptique.

À ce mouvement de précession s'ajoute un mouvement dit de **nutaton**, prédit par Newton dans *Principia Mathematica* et découvert par Bradley en 1748. Il s'agit d'un mouvement



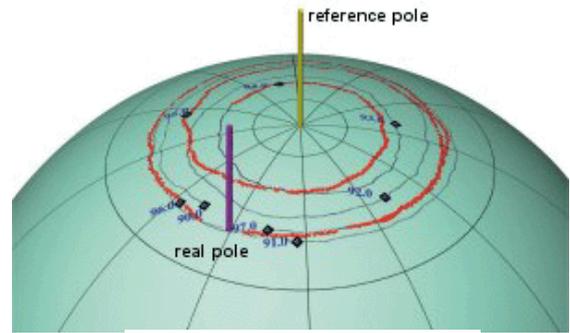
périodique de faible amplitude (9,21") et de période maximale 18,6 ans que subit l'axe de la Terre autour d'une position moyenne située sur le cône de précession. Elle est due à l'évolution de l'orbite de la Lune, perturbée par le Soleil, autour de la Terre ; l'action de la Lune vient légèrement perturber la précession en créant ces "vaguelettes".

D'autres mouvements de nutation, d'amplitude plus faible et de périodicité annuelle ou semi annuelle, ont été mis en évidence. Ils composent un mouvement global complexe, tant sur le plan de la trajectoire que de la vitesse, si on veut le suivre dans tous ses détails.

Le déplacement de l'axe de rotation par rapport à la Terre elle-même

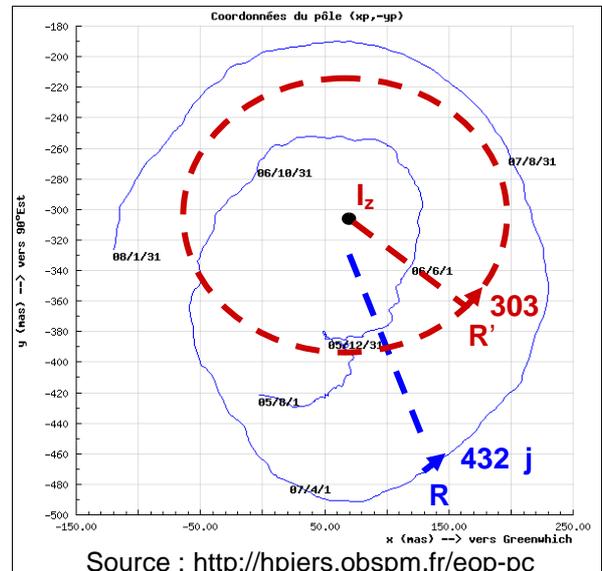
Avec un modèle d'ellipsoïde de révolution homogène solide, le grand mathématicien Euler (1707-1783) avait démontré que si l'axe de rotation de l'ellipsoïde n'est pas confondu avec son axe de symétrie, il est affecté d'un mouvement de précession autour de l'axe de symétrie. En appliquant son calcul à la Terre il évalue la période à 303 jours. La position du pôle devrait donc décrire un cercle autour d'une position fixe en dix mois environ.

L'astronome américain Seth Chandler (1846-1913) met en évidence un tel phénomène en 1891 : un mouvement du pôle ou **Polhodie** (littéralement en grec : chemin du pôle) à peu près circulaire et de période environ 432 jours, à comparer aux 303 jours prévus avec le modèle d'Euler.



Mouvement du pôle ; polhodie

Peu après un autre américain Simon Newcomb (1835-1909) montra que cet écart entre valeur prévue à partir du modèle ellipsoïdal rigide et la valeur mesurée résultait de la non rigidité de la Terre. A la même époque, en France, Henri Poincaré émettait lui aussi l'hypothèse que la Terre possédait un noyau fluide et que le noyau et le manteau terrestre ne tournaient pas exactement selon le même axe. Cette hypothèse n'a été



Source : <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc>

— — Terre réelle - - - Terre rigide

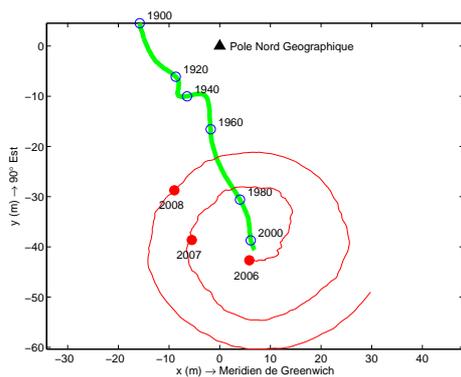
Mouvement du pôle : comparaison entre une Terre rigide et une terre "réelle"

validée que très récemment et a des effets sur la nutation de l'axe de rotation. Nous reviendrons ultérieurement sur les multiples effets de la structure interne de la Terre.

Actuellement, la trajectoire du pôle est connue à quelques millimètres près.

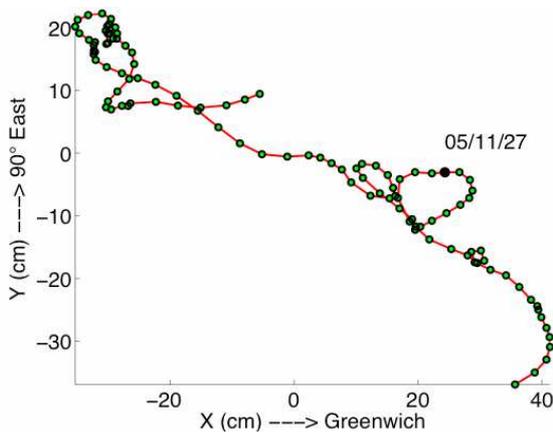
Elle se compose non seulement de l'oscillation découverte par Chandler (en rouge sur la figure) mais aussi d'une oscillation annuelle forcée et d'une dérive séculaire de la position moyenne du pôle (quelques centimètres par an en direction du Groenland avec une vitesse de 0,4 seconde d'arc par siècle), avec des mouvements irréguliers (en

vert sur la figure). Depuis l'année 1900, il s'est déplacé d'environ 50 m.



— dérive séculaire
— dérive apparente

La trajectoire subit aussi des fluctuations à très court terme (ci-dessous en moins de 20 jours).



Variations rapides de la position du pôle pour de courtes durées (20 jours).

Actuellement la rotation de la Terre est définie comme "la rotation de la croûte terrestre ou lithosphère par rapport aux étoiles".

De nombreux paramètres liés à la structure de la Terre, tant en surface qu'à l'intérieur, interviennent pour perturber les mouvements calculables avec des modèles simples (ellipsoïde rigide ou fluide) : variation de la pression au fond des océans, fluctuation de la pression atmosphérique

et des vents, circulation atmosphérique saisonnière, mouvements de convection du manteau terrestre, fonte des calottes glaciaires, friction entre le manteau constitué d'un solide (non rigide) et le noyau terrestre (liquide), entre le noyau et la graine (solide)... que nous détaillerons dans un prochain article.

2. Implications sur la durée du jour

La dynamique de la rotation de la Terre implique des mouvements de son axe mais aussi des fluctuations de la vitesse de rotation autour de cet axe. Christian Bizouard, astronome à l'Observatoire de Paris, indique que ces fluctuations de vitesse ne furent décelées que vers 1930 et que jusque là la rotation diurne assurait *la fonction d'horloge sans défaut*. Jusqu'en 1972, l'échelle de temps reposa sur la **succession des jours solaires moyens**.

On sait depuis longtemps que la Terre ralentit et que la durée du jour augmente de 2 ms par siècle, phénomène dû à la friction entre les océans et la croûte terrestre, qui dissipe de l'énergie. Depuis peu, on a observé des irrégularités grâce aux horloges atomiques. Ces irrégularités ont des périodes variables suivant qu'elles sont dues à la fonte des glaciers ou aux mouvements saisonniers de l'atmosphère terrestre, ou encore au noyau terrestre.

Je remercie particulièrement Christian Bizouard, astronome à l'Observatoire de Paris au Service International de la Rotation de la Terre (IERS), pour ses explications et pour la documentation fournie qui sert à illustrer cet article.

Sources :

Etienne Ghys, CNRS/ENS Lyon : "La forme de la Terre : un problème mathématique"

<http://planet-terre.ens->

[lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-forme-terre-Ghys_conf.xml](http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-forme-terre-Ghys_conf.xml)

Greff-Lefftz, Marianne. (2004). *La Terre, une toupie au cœur liquide*, Pour la Science, 318, 58-63.

Rotation d'un œuf cru et d'un œuf dur

Pour percevoir la différence entre la rotation d'un corps solide et d'un corps qui contient une partie fluide, on peut faire une petite expérience : prendre un œuf cru et un œuf dur, chacun d'eux posé sur une assiette.

Puis les faire tourner comme une toupie et observer la différence !