

Oblivités des planètes Chaos et stabilité

Andy Richard, doctorant à l'IMCCE, Observatoire de Paris

Toutes les planètes tournent sur elles-mêmes. Mais d'où vient cette rotation ? Pourquoi les axes sont-ils tous inclinés différemment ? Qu'appelle-t-on le pôle Nord d'une planète ? Andy Richard répond ici à ces différentes questions.

Une variété d'oblivités

Connaître l'orientation d'une planète dans l'espace suppose que l'on puisse observer la façon dont elle tourne. Ces observations nécessitent l'utilisation d'instruments optiques permettant de voir les structures de la surface d'une planète, afin d'en mesurer l'évolution. C'est ce que Jean-Dominique Cassini effectua en 1665 en estimant la période de rotation de Jupiter via l'évolution des tâches présentes dans son atmosphère. De nos jours, ces observations sont de plus en plus nombreuses et précises, et nous permettent d'avoir une excellente idée de la diversité des configurations planétaires. Les planètes du Système Solaire possèdent en effet chacune une obliquité particulière.

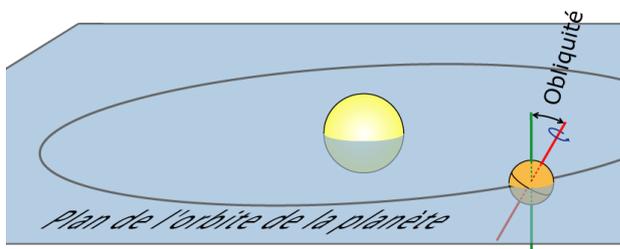


Fig.1. Première définition de l'obliquité : c'est l'angle entre l'axe de rotation de la planète (en rouge) et la normale au plan orbital (en vert).

Malgré ce que l'on pourrait penser au premier abord, les planètes ne possèdent pas toutes la même obliquité, même si l'on trouve quelques similitudes. De plus, cette obliquité a évolué au cours de l'histoire du Système Solaire, menant à la configuration dans laquelle se trouvent les planètes actuellement. Certaines d'entre elles ont une faible obliquité comme Mercure ($< 0,1^\circ$) ou Jupiter (3°), d'autres sont plus inclinées : Terre (23°), Mars (25°), Saturne (27°) et Neptune (30°). Enfin, certaines possèdent une obliquité singulière : Vénus

(177°) et Uranus (98°)⁷. La distribution de ces obliquités est le fruit de l'évolution du Système Solaire et des planètes au cours de sa formation. Elle a subi de grands changements au cours des 4,5 milliards d'années écoulées depuis la formation du Système Solaire, et l'état dans lequel nous voyons les planètes actuellement subira encore de grands changements dans un avenir lointain.

L'obliquité de la Terre

La Terre possède une obliquité de 23° , responsable des saisons que nous connaissons. Cette obliquité est en réalité stabilisée par la Lune. En effet, l'obliquité des planètes telluriques est chaotique, c'est-à-dire fortement dépendante des conditions initiales, et imprévisible sur le long terme⁸. Pour la Terre, sa valeur ne peut varier que d'environ 1° autour de sa valeur actuelle grâce à la présence de la Lune. Ces variations de l'obliquité sont cependant l'une des causes dynamiques des grandes ères climatiques de l'histoire de la planète⁹. Si l'obliquité change, même d'un degré, l'orientation de la Terre par rapport au Soleil est modifiée. Par conséquent, l'ensoleillement varie, et le climat également. Ces variations climatiques issues de variations célestes se retrouvent effectivement dans les preuves géologiques. Une simulation numérique montre que dans un scénario catastrophique où la Lune disparaîtrait, l'obliquité de la Terre se mettrait à varier de façon très importante, allant de 15° à 30° sur 200 millions d'années. Les conséquences pour le climat terrestre seraient bien entendu désastreuses. La Lune stabilise donc l'orientation de l'axe de la Terre. Ce n'est

⁷ Ces obliquités supérieures à 90° ne sont plus un angle entre deux droites comme nous le verrons à la figure 4.

⁸ Ces variations sont dues aux interactions avec les planètes géantes.

⁹ Voir par exemple l'article de Jean Souchay dans le n° 129 des CC (mars 2010).

pas le cas de Mars qui ne possède pas de satellite important et pour qui l'obliquité a pu varier entre 10° et 60° dans le passé.

Le pôle Nord de la Terre

Le pôle Nord de la Terre existe sous différentes formes : pôle géographique, pôle magnétique, pôle géomagnétique, pôle de l'inaccessibilité. Le pôle Nord géographique correspond à l'une des intersections entre l'axe de rotation de la planète et la surface.

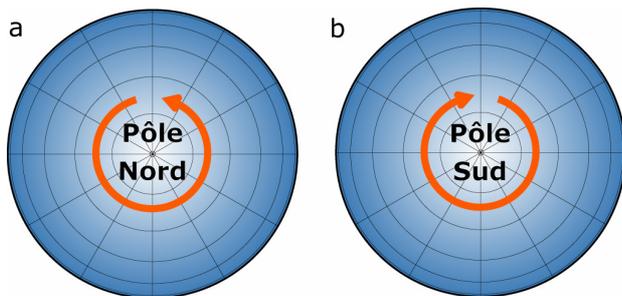


Fig.2. a. Si on se place au-dessus du pôle Nord géographique tout en restant fixe par rapport aux étoiles, on verra la Terre tourner dans le sens direct (sens inverse des aiguilles d'une montre). **b.** C'est l'inverse si on se place au dessus du pôle Sud.

Les géophysiciens ont montré depuis les calculs d'Euler en 1750 que ce point d'intersection n'est pas fixe, le pôle géographique se déplace à la surface de la planète sur quelques mètres avec une période d'environ 435 jours. Les méridiens et fuseaux horaires sont définis à partir de ce pôle géographique. En revanche, le pôle Nord magnétique correspond à l'endroit où les lignes du champ magnétique terrestre s'enfoncent verticalement dans le sol. Les aiguilles des boussoles convergent toutes vers ce point, qui est en réalité le pôle Sud de « l'aimant » terrestre. Ce pôle se situe à moins de 1 000 km du pôle géographique (au nord du Canada) et est également en mouvement à la surface de la planète, par une dérive d'une cinquantaine de kilomètres par an en direction de la Russie. Le pôle géomagnétique est calculé à partir d'une modélisation du champ magnétique de la Terre sous la forme d'un dipôle magnétique. Le pôle Sud de ce dipôle théorique définit donc le pôle Nord géomagnétique. Enfin, d'un point de vue géométrique, le pôle Nord de l'inaccessibilité est le point de l'Arctique le plus éloigné de toutes les terres.

Le pôle Nord des planètes

Pour les planètes du Système Solaire, quelques-unes de ces définitions sont reprises. On connaît le pôle géographique grâce à l'axe de rotation et le pôle magnétique pour les corps qui possèdent un champ magnétique mesuré. La définition la plus simple du pôle Nord d'un corps réside donc dans l'une des

intersections entre son axe de rotation et sa surface, observable pour la plupart d'entre eux (cela se complique pour Vénus par exemple qui possède une atmosphère épaisse ne laissant pas apparaître sa surface, et nécessite donc des mesures radar).

Une résolution de l'UAI (Union Astronomique Internationale) pose clairement la définition du pôle Nord d'une planète comme étant l'intersection de l'axe de rotation avec la surface du côté Nord (du point de vue terrestre) du plan invariant du Système Solaire (plan contenant le barycentre du Système Solaire et perpendiculaire au vecteur moment cinétique total, proche du plan de l'orbite de Jupiter). Par conséquent, le pôle Nord de Vénus possède une obliquité de 3° et sa rotation est rétrograde. Cette définition est cependant très « géocentrique » et pose problème lorsqu'on s'intéresse au pôle Nord des planètes extra-solaires, ou exoplanètes. On ne peut définir le Nord ou le Sud des systèmes extra-solaires de la même façon car leur orientation par rapport à la Terre est purement aléatoire. Il est alors plus judicieux de revenir à une définition mécanique du pôle Nord, en utilisant l'axe de rotation : en se positionnant au-dessus du pôle Nord d'une planète, et en regardant la planète tourner, sa rotation doit se faire dans le sens anti-horaire, comme sur la figure 2a. Cette définition peut donc parfois être contradictoire avec celle de l'UAI dans les quelques cas de rotation rétrograde, car elle amène le pôle Nord de Vénus à être orienté dans le sens du pôle Sud de la Terre, mais elle possède l'avantage d'être universelle.

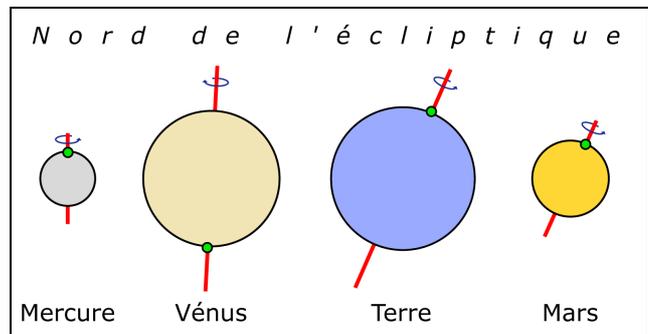


Fig.3. Obliquité des planètes telluriques. On a noté en vert le pôle Nord "mécanique" lié au sens de rotation de la planète. Le pôle Nord au sens de l'UAI est en haut de l'image, du côté du nord de l'écliptique. Il n'y a que pour Vénus ici que ces deux pôles Nord sont différents.

Les astronomes ont donc deux définitions différentes du Nord, selon leur domaine de travail. Cela ne pose pourtant pas de problèmes de communication, car la définition de l'UAI permet d'accorder les astronomes et de faciliter les observations dans notre Système Solaire.

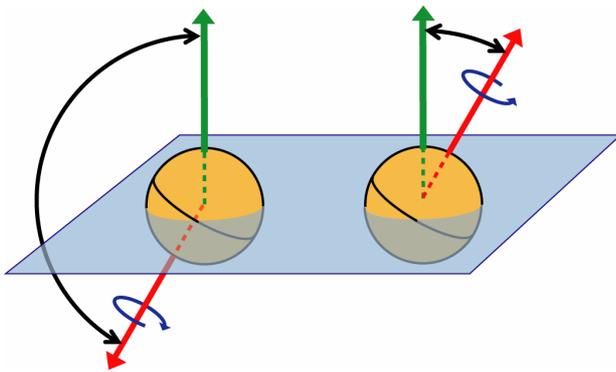


Fig.4. Deuxième définition de l'obliquité : c'est un angle entre deux demi-droites, la première indiquant la direction du nord de l'orbite (en vert), la deuxième la direction du pôle nord "mécanique", pôle d'où l'on voit la planète tourner dans le sens direct (en rouge). Elle ne diffère de la première définition de la figure 1 que pour les planètes à rotation rétrograde (à gauche) dont l'obliquité est alors supérieure à 90° .

La formation du Système Solaire

Pour comprendre l'origine des obliquités et de la rotation des planètes actuelles, il faut remonter à leur formation. Les systèmes planétaires se forment à partir de ce que l'on appelle un disque protoplanétaire. Ce disque résulte de l'effondrement gravitationnel des nuages moléculaires (nébuleuses) dans lesquels se forment les étoiles. La nouvelle étoile formée dans une nébuleuse va condenser la matière de son environnement pour former un disque de gaz et de poussières en rotation autour d'elle. À l'intérieur de ce disque, des processus d'accrétion vont amener les poussières à se regrouper et se coller les unes aux autres, formant petit à petit des corps de la taille du centimètre puis du mètre. Lorsque ces corps solides dépassent le kilomètre, ils sont alors qualifiés de « planétésimaux ». Ce sont des embryons planétaires qui ne possèdent pas encore la taille finale ni les caractéristiques des planètes actuelles. Leur évolution est la clé de la formation de nos planètes. Ces planétésimaux vont alors continuer de grandir, en attirant toujours plus de poussières (planètes telluriques) puis, lorsqu'ils atteignent une masse suffisante, en attirant du gaz (géantes gazeuses). Lors de leur formation, les planétésimaux possèdent en principe une obliquité nulle (leur axe de rotation est perpendiculaire au plan du disque), liée au fait que les poussières ont globalement une trajectoire contenue dans le plan du disque. Le sens de rotation des planétésimaux est également le même. La capture des poussières et des grains se fait de telle façon que chaque particule contribue dans le même sens à la rotation de la nouvelle planète. Ces particules sont capturées lorsqu'elles évoluent sur des orbites tangentes à celle d'un corps plus massif, et la différence de vitesse entre le planétésimal et la

particule lors de la capture est à l'origine d'un incrément d'inertie positif¹⁰.

En revanche, la force gravitationnelle devenant de plus en plus importante au fur et à mesure que la masse des planétésimaux augmente, l'attraction mutuelle des corps va les amener à se perturber, se croiser et même parfois à entrer en collision. Les collisions peuvent être à l'origine de grands changements dans la répartition des obliquités et des rotations des planétésimaux. À la fin de la formation planétaire, le gaz du disque protoplanétaire se dissipe, et les planètes géantes alors situées dans des orbites compactes se mettent à migrer. Ce modèle de migration est appelé modèle de Nice.

Particularités de Vénus et Uranus

Ce système de formation des planètes, imaginé indépendamment par Kant (1755) et Laplace (1796) explique la similarité dans le sens de rotation et l'obliquité de la plupart des planètes. Cependant, des cas particuliers se dressent au milieu de notre Système Solaire. Pourquoi Vénus tourne-t-elle dans le sens inverse des autres planètes? Pourquoi Uranus semble couchée sur son orbite avec son inclinaison de 98° ?

Pour Vénus, les astronomes de l'IMCCE (Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides) ont montré que sa rotation rétrograde (Vénus tourne dans le sens inverse par rapport aux autres planètes) peut résulter de deux processus : soit l'axe de rotation de la planète a basculé de 180° , soit la rotation de Vénus a ralenti jusqu'à s'inverser. D'après le modèle de formation de planètes décrit précédemment, Vénus a dû se former avec une obliquité nulle et une rotation très rapide. Les marées solides du Soleil sur Vénus (déformations de la planète par l'attraction gravitationnelle d'un corps massif) ont pour effet de ralentir la rotation rapide et prograde (dans le même sens que les planètes primitives). Simultanément, l'effet des autres planètes rend l'évolution de l'axe de rotation de Vénus chaotique. Son obliquité varie fortement. Finalement, lorsque la rotation de la planète est suffisamment lente, l'interaction entre le noyau et le manteau de la planète tend à ramener l'obliquité à 0 ou 180° suivant l'orientation de l'axe de la planète à ce moment. La rotation est ensuite légèrement

¹⁰ Le lecteur qui voudrait davantage d'information pourra se reporter à la page : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-rotation.xml>

accélérée par un effet dit de marée atmosphérique. La rotation actuelle de Vénus est effectivement très lente puisqu'un jour sur Vénus dure 243 jours terrestres¹¹. Le basculement de l'axe de Vénus ou l'inversion de sa rotation sont deux scénarios d'évolution compatibles avec les observations, et leur probabilité est comparable.

Pour Uranus, les choses sont sensiblement différentes car son axe de rotation est stable, contrairement à Vénus. Les astronomes ont proposé de nombreuses théories pour expliquer l'obliquité de 98° de la géante gazeuse. La théorie de la grande collision est celle qui est le plus souvent citée. Une planète de la taille de la Terre a pu entrer en collision avec Uranus l'amenant à se coucher sur son orbite. Les débris de la collision ont pu alors former les nombreux satellites de la planète, qui évoluent dans son plan équatorial. Mais un impact aussi titanesque aurait dû en principe souffler l'atmosphère d'Uranus, ce qui visiblement n'est pas le cas. Une autre explication peut être apportée par le fait que lors de la formation des planètes, Jupiter et Saturne ont migré à l'intérieur du Système Solaire et ont pu perturber l'axe d'Uranus. Ce basculement de l'axe de rotation d'Uranus peut alors se faire si la planète possède un satellite supplémentaire à cette époque, qui est éjecté à la suite du basculement.

L'influence des planètes géantes rend l'obliquité des planètes telluriques chaotique tandis que pour les géantes elle est plutôt stable. Malgré cette stabilité, l'obliquité de Saturne et celle de Neptune avoisinent les 30°. Sachant qu'elles se sont formées avec une obliquité nulle, leurs axes de rotation ont dû s'incliner durant l'évolution du Système Solaire. Les interactions entre Saturne et Neptune lors de leur migration dans le Système Solaire pour atteindre leurs positions actuelles peuvent expliquer leurs obliquités.

Le cas du basculement d'Uranus reste cependant encore un des mystères de notre Système Solaire, même si de plus en plus de scénarios permettent d'expliquer cette évolution. L'orientation des planètes est donc le résultat d'interactions séculaires entre les planètes, que ce soit au moment de la formation du Système Solaire ou encore à l'heure actuelle, comme le montre l'instabilité de l'obliquité des planètes telluriques.

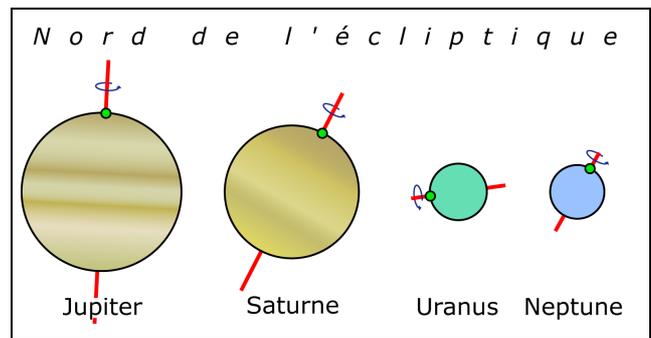


Fig.5. Obliquité des planètes géantes. Uranus a une obliquité supérieure à 90° : son pôle Nord "mécanique" est au sud de l'écliptique.

Bibliographie

Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences des arts et des métiers, Denis Diderot, Volume 29.

Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from -20 MYR to +10 MYR, Laskar et al., *A&A*, 1993.

Rotation à long terme des planètes, application au basculement d'Uranus, thèse de Gwenaél Boué, Observatoire de Paris, 2010.

Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac, United States Naval Observatory, 1992.

Long-term evolution of the spin of Venus , II. Numerical simulations , Correia et al., 2003, *Icarus*, Volume 163, Issue 1.

Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars, Laskar et al., 2004, *Icarus* Volume 170.

La Lune et l'origine de l'homme, Laskar, *Pour la science*, n°186, avril 1993.



Mars et ses deux pôles, photographiée par le télescope spatial Hubble en 2001. Le pôle Nord est en haut de l'image. Crédit Image: NASA et l'équipe Hubble Heritage (STScI/AURA).

¹¹ Il s'agit ici de jour sidéral, la durée du jour solaire moyen étant d'un peu moins de 117 jours.