

veut que Denys l'Aréopagite, apprenant la vraie nature de l'éclipse (le miracle) de l'apôtre Paul, se soit converti au christianisme, ait ensuite gagné la France, dont il aurait converti les habitants! Dieu ne pouvait se contredire et restait contraint par les lois de la physique qu'il avait créées : il n'y eut pas d'éclipse de Soleil à cette période.

L'historien Zosime, qui vécut au ^v^e siècle de notre ère, auteur d'une *Histoire nouvelle*, relate une bataille entre Eugène, Arbogast et Théodose, dite bataille du Frigidus, qui se déroula le 5 septembre 394 dans les Alpes Juliennes : «Lorsque Eugène marcha à leur rencontre avec l'ensemble de ses troupes et que les armées en vinrent aux mains l'une avec l'autre, il se produisit au moment même du combat une éclipse de Soleil si complète qu'il sembla plutôt faire nuit que jour pendant un laps de temps considérable.» L'indication que l'éclipse dura «un laps de temps considérable» est suspecte : le calcul astronomique montre qu'aucune éclipse de Soleil n'eut lieu le 5 septembre 394! Zosime a sans doute inventé cette éclipse de Soleil pour expliquer la défaite d'Eugène face à Théodose : les hommes d'Eugène auraient été massacrés, exténués par un combat nocturne...

En vérifiant des éclipses anciennes, les astronomes du ^{xvii}^e siècle seront

confrontés à une énigme dont les tenants et les aboutissants ne seront totalement compris qu'au début du ^{xx}^e siècle. La naissance de la mécanique céleste, après Newton, a permis d'importants progrès dans la théorie du mouvement de la Lune, où les astronomes savaient intégrer les perturbations dues au Soleil. Il apparut cependant que la théorie du mouvement de la Lune s'écarterait de l'observation lorsque l'on calculait des éclipses de Soleil anciennes : il subsistait des décalages inexplicables entre l'heure observée, rapportée par tel ou tel astronome de l'Antiquité, et l'heure calculée à l'aide de la théorie.

Le décalage des éclipses

Au ^{xviii}^e siècle, les astronomes conclurent que, vu, de la Terre, la Lune avait accéléré lentement sur son orbite au cours des siècles d'une quantité égale à environ 20'' par siècle carré. Pierre Simon de Laplace crut expliquer cette accélération séculaire par la variation de l'excentricité de l'orbite terrestre (l'excentricité mesure l'allongement d'une orbite elliptique), causée par les perturbations planétaires. L'effet gravitationnel des planètes modifiant lentement l'excentricité de l'orbite terrestre, l'orbite lunaire en aurait été modifiée. Effectivement, ces calculs

expliquaient une accélération séculaire proche de celle observée.

Toutefois, au milieu du ^{xix}^e siècle, le problème rebondit grâce à John Couch Adams, le codécouvreur de la planète Neptune : en refaisant les calculs avec le Français Charles Delaunay, les astronomes conclurent que la théorie de la gravitation expliquait une accélération séculaire de 12'' par siècle carré, alors que les analyses des observations anciennes indiquaient une accélération deux fois plus grande. Quelle était l'origine de cette accélération supplémentaire?

La réponse fut trouvée au début du ^{xx}^e siècle : sous l'effet des frottements dus aux marées dans les océans et dans les différentes couches du manteau terrestre, la Terre ralentit sa rotation. Comme le système Terre-Lune est, en première approximation, isolé dans l'espace, le moment cinétique du système se conserve (le moment cinétique d'un corps en rotation est le produit de la vitesse de chaque masse ponctuelle du corps par la distance de cette masse à l'axe de rotation). La diminution du moment cinétique de la Terre est alors compensée par une augmentation du moment cinétique orbital de la Lune. Ainsi, la distance de la Terre à la Lune augmente et la vitesse orbitale de la Lune diminue (selon la deuxième loi



de Kepler, la vitesse orbitale diminue avec la distance).

Toutefois, de la Terre, les observations du mouvement de la Lune ne permettent pas de distinguer son accélération apparente, imputable au freinage de la rotation terrestre (le fait que nous soyons sur un référentiel qui ralentit fait que la Lune semble accélérer) et la décélération orbitale réelle de la Lune. C'est parce que le premier effet l'emporte sur le second que l'on observe une accélération apparente du mouvement lunaire. Autrement dit, les observations anciennes de la Lune, qui utilisent la rotation de la Terre pour définir l'échelle de temps, mettent en évidence une accélération apparente de notre satellite (de 20'' par siècle carré), dont les deux composantes, le ralentissement de la rotation de la Terre et la décélération séculaire propre de la Lune (dénommé ralentissement séculaire), sont imbriquées.

Le ralentissement séculaire

Aujourd'hui, à l'aide de références extérieures au système Terre-Lune, notamment l'observation d'autres corps du Système solaire, on distingue les deux ralentissements. Le ralentissement propre de la Lune est ainsi connu avec précision, notamment grâce aux observations du «laser-Lune». Les cinq réflecteurs installés sur la Lune, lors des missions *Apollo 11*, en 1969, jusqu'à *Lunakhod 2*, en 1973, réfléchissent les impulsions lumineuses émises par des

lasers terrestres. Ces tirs lasers fournissent la distance Terre-Lune avec une précision de quelques centimètres : c'est la moitié de la durée de l'aller et retour de l'impulsion laser multiplié par la vitesse de la lumière. L'étude des variations de cette distance permet d'améliorer les théories du mouvement de la Lune et de déduire, entre autres, la valeur du ralentissement séculaire de la Lune. On notera cependant que l'étude des anciens passages de Mercure devant le Soleil et des occultations d'étoiles par la Lune avait fourni une valeur du ralentissement séculaire très proche de celle de la méthode laser.

Le ralentissement séculaire de la Lune est dû à deux facteurs : une composante qui résulte des forces d'attraction entre corps rigides sans déformation, connue avec précision, et une composante due aux forces de marées, qui dépend de constantes géophysiques mal connues. Cette méconnaissance de certains paramètres géophysiques reste la principale cause d'incertitude dans la prévision du mouvement de la Lune dès que l'on s'écarte de plus d'un siècle de la période contemporaine.

Le ralentissement séculaire de la Lune dans le calcul d'une éclipse de Soleil ne résout pas la totalité du problème : on doit aussi tenir compte du ralentissement de la rotation de la Terre. Un exemple concret permet de comprendre l'importance du phénomène. Avec le déchiffrement des textes cunéiformes astronomiques babyloniens, à la fin du XIX^e siècle, on a pu découvrir

sur une tablette d'argile, conservée au British Museum, la mention d'une éclipse totale de Soleil visible à Babylone. L'étude de la tablette permet de dater l'éclipse : 15 avril 136 avant notre ère. Supposons, dans un premier temps, que la Terre tourne sur elle-même de façon parfaitement uniforme et calculons où l'éclipse aurait été totale (voir la figure 3a). La zone de totalité, c'est-à-dire la bande dans laquelle l'éclipse est totale, passerait en Europe, à des milliers de kilomètres de Babylone.

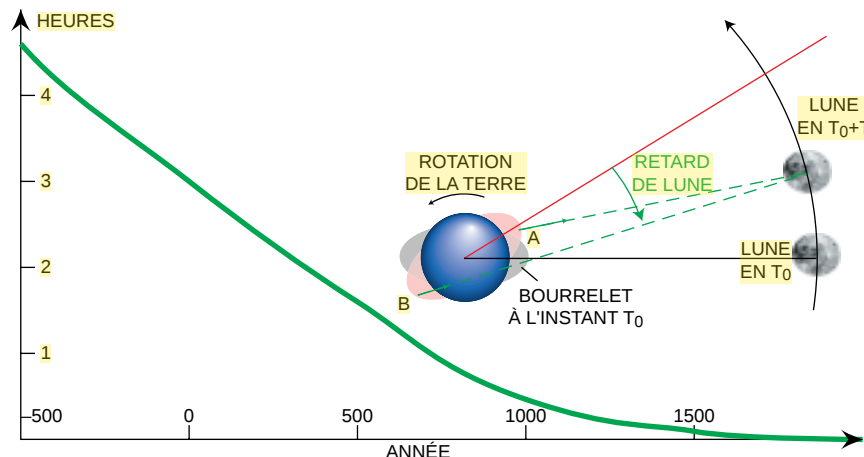
L'horloge terrestre retarde

La question que se pose l'astronome est alors la suivante : de combien de secondes l'«horloge Terre» a-t-elle ralenti par rapport à l'«horloge idéale», – qui suppose une rotation uniforme de la Terre depuis cette époque – pour que l'éclipse soit totale à Babylone ? Il ne peut s'agir que d'une détermination empirique : en prenant une dérive d'horloge de 11 700 secondes, soit 3 heures et 15 minutes, on déplace la ligne de centralité exactement sur Babylone (voir la figure 3b). Bien entendu, la bande de centralité a une certaine largeur et une erreur de quelques minutes dans la dérive d'horloge place encore Babylone dans la zone où l'éclipse est totale.

Ce ralentissement de la rotation de la Terre se poursuit évidemment et constitue une limite aux prédictions astronomiques futures. On peut bien sûr prévoir à quelle date aura lieu la prochaine éclipse totale visible en France au XXV^e siècle, par exemple, mais il est impossible de prédire exactement les limites de la bande de totalité. Non seulement la rotation de la Terre ralentit en raison des marées, mais des irrégularités dans son mouvement de rotation empêchent de prévoir de combien de secondes la Terre aura ralenti ou accéléré dans cinq siècles.

Qu'en est-il à très long terme ? Dans des centaines de millions d'années, la période de révolution de la Lune autour de la Terre, qui vaut 27 jours 8 heures, sera de 30 jours. Dans le même temps, la distance Terre-Lune aura augmenté au rythme de trois centimètres par an. Toutefois, ces deux valeurs sont à prendre avec précaution, car il n'est pas certain que le ralentissement séculaire de la Lune reste constant des millions d'années durant.

Pour le spécialiste des irrégularités de la rotation de la Terre, il convient de



2. LA DÉRIVE DE L'HORLOGE TERRE par rapport à une horloge uniforme augmente à mesure que l'on remonte dans le passé. Cette dérive, exprimée en heure en fonction de l'année, est estimée à l'aide d'observations d'éclipses anciennes. En raison des frottements à l'intérieur de la Terre, les déformations dues aux marées retardent par rapport à la Lune. Entraîné par la rotation de la Terre, le bourrelet des marées est en avance par rapport à la direction Terre-Lune (schéma). La Lune exerce alors un couple sur le bourrelet (la Lune attire plus la partie A que la partie B), qui à ramène l'axe du bourrelet dans la direction Terre-Lune : la rotation de la Terre est freinée.