

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.

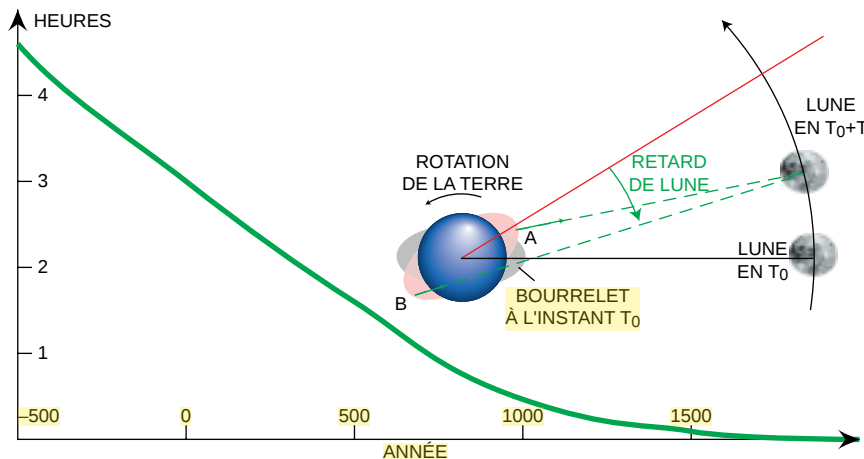
L'horloge terrestre retarde

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.

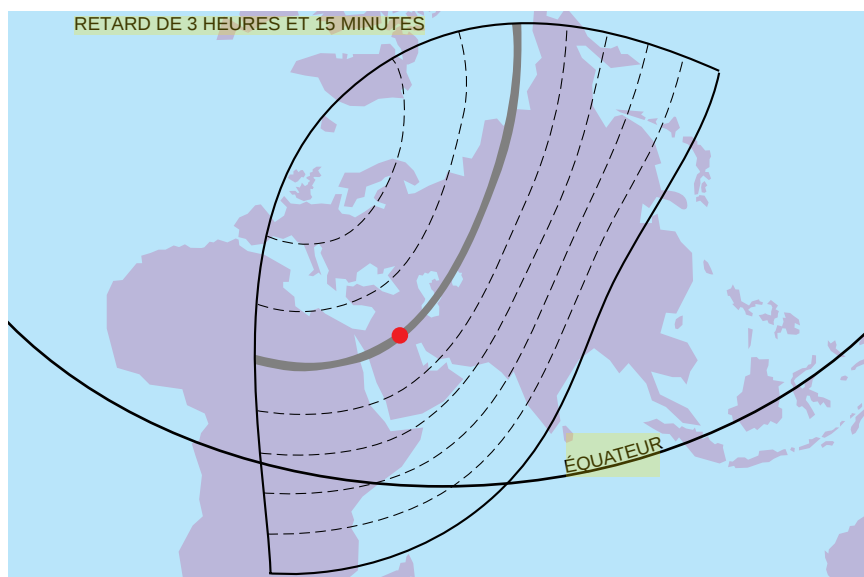
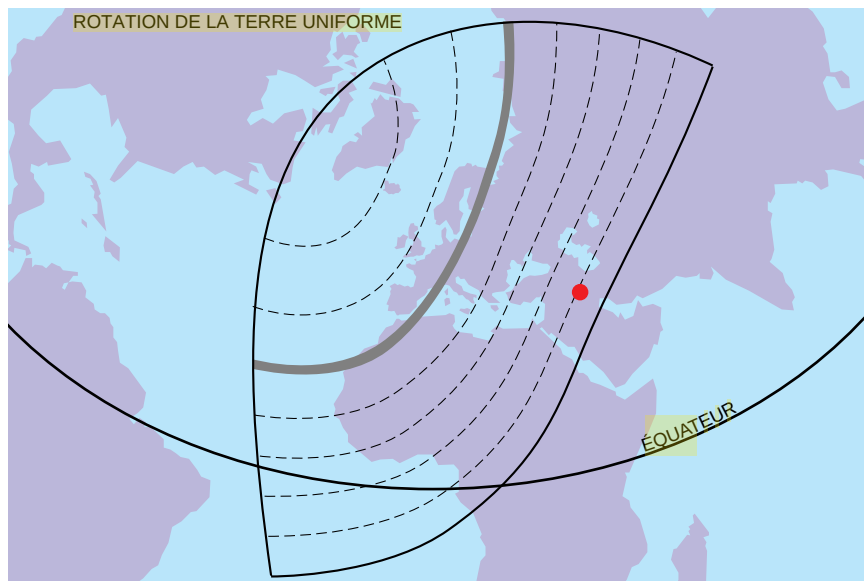
Ce ralentissement de la rotation de la Terre se poursuit évidemment et constitue une limite aux prédictions astronomiques futures. On peut bien sûr prévoir à quelle date aura lieu la prochaine éclipse totale visible en France au XXV^e siècle, par exemple, mais il est impossible de prédire exactement 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.



3. LES DONNÉES SUR LES ÉCLIPSES ANCIENNES permettent d'estimer les variations de la rotation de la Terre. Le 15 avril –135, une éclipse totale de Soleil est signalée à Babylone. Si l'on suppose que la Terre tourne sur elle-même de manière uniforme, on calcule la bande de centralité (*en haut*). L'éclipse totale ne passe alors pas à Babylone (*point rouge*) : dans la bande grisée, dont la largeur ne peut dépasser 270 kilomètres, l'éclipse est totale ; en dehors de cette bande, l'éclipse est partielle. Pour que l'éclipse soit totale à Babylone, il faut que la Terre ait ralenti de 3 heures 15 minutes par rapport à une rotation uniforme (*en bas*).

sélectionner les observations, principalement celles des éclipses de Soleil et de Lune, car toutes ne sont pas exploitables. Les 400 observations utilisées proviennent de quatre civilisations : babylonienne, pour la période comprise entre 700 et 50 avant notre ère ; chinoise, pour la période qui s'étend de 700 avant notre ère à 1500 de notre ère ; européenne, pour la période 500 avant notre ère à 1600 de notre ère ; arabe enfin, pour la période entre les années 800 et 1300 (il n'existe pas de mention utilisable d'observations dues aux Égyptiens, aux Indiens ou aux Mayas).

Les références d'éclipses se trouvent dans les tablettes d'argile, dans des chroniques ou dans des manuscrits. Il faut ensuite les traduire, les dater – ce qui est souvent le plus difficile, en raison du calendrier et de l'ère utilisés –, déterminer pour quel lieu l'éclipse est rapportée, puis en tirer des informations utiles. Toutes ces recherches demandent les compétences de philologues, d'historiens et d'astronomes.

Certaines mentions comportent l'année, le lieu et l'heure de l'éclipse ; ainsi, une éclipse de Lune est décrite par Ptolémée dans l'*Almageste* : « Dans la septième année de Philometor, qui

est la 574^e [de l'ère] de Nabonassar, du 27 au 28 du mois Phamenoth dans le calendrier égyptien, depuis le commencement de la huitième heure jusqu'à la fin de la dixième à Alexandrie, il y eut une éclipse de Lune qui atteignit au maximum sept doigts d'obscurcissement depuis le Nord, le milieu de l'éclipse tombant deux heures et demie temporaires après minuit ». Grâce à ces indications chronologiques, les astronomes fixent l'éclipse dans la nuit du 30 avril au 1^{er} mai 174 avant notre ère à Alexandrie ; l'éclipse fut partielle, car seulement « sept doigts » du diamètre de la Lune sont plongés dans l'ombre. Il faut ensuite convertir l'heure temporaire en heure moderne pour en déduire finalement la dérive de l'horloge Terre.

Toutes les mentions d'éclipses sont loin d'être aussi détaillées ; certaines sont même inutilisables. En l'absence d'éléments horaires, il faut distinguer si l'éclipse a eu lieu au lever ou au coucher. Parfois, celui qui décrit une éclipse mentionne des indications très utiles, telle la présence de planètes visibles durant une éclipse totale de Soleil.

L'un des grands spécialistes mondiaux de l'analyse des éclipses anciennes, Richard Stephenson, de l'Université de Durham, a mis en évidence qu'entre 500 avant notre ère et la période actuelle l'allongement du jour a été en moyenne de 1,7 milliseconde par siècle. Un tel freinage peut paraître insignifiant, mais il a des effets cumulatifs importants : en un siècle, l'horloge Terre perd une minute (1,7 milliseconde multiplié par 365 jours multiplié par 100 ans). Ainsi, au cours des siècles on estime la différence entre une horloge uniforme idéale et l'horloge terrestre (*voir la figure 2*). Tous ces travaux sont extrêmement utiles aux géophysiciens dans la compréhension de la structure de notre planète. Ils trouvent aussi une application pratique dans les logiciels d'astronomie distribués dans le commerce – du moins ceux écrits par des personnes compétentes –, où l'on peut effectuer des recherches d'éclipses passées et futures.

Denis SAVOIE est historien des sciences, associé à l'Observatoire de Paris.

F.R. STEPHENSON, *Historical Eclipses and Earth's Rotation*, Cambridge University Press, 1997.

J.P. VERDET, *Une histoire de l'astronomie*, Seuil, 1990.
