

le jeudi 4 octobre. Par ailleurs, on décida d'omettre trois jours intercalaires tous les quatre siècles (les années séculaires ne sont bissextiles que si leur millésime est divisible par 400).

Ce nouveau calendrier dit grégorien fut plus ou moins vite adopté selon les pays. La Grande-Bretagne et ses colonies (et plus généralement les pays protestants et orthodoxes) résistèrent pendant deux siècles. George Washington est par exemple né le 11 février 1731 selon le calendrier julien, mais son anniversaire est célébré le 22 février, le calendrier grégorien ayant été adopté sur la côte Est des États-Unis de son vivant, en 1752.

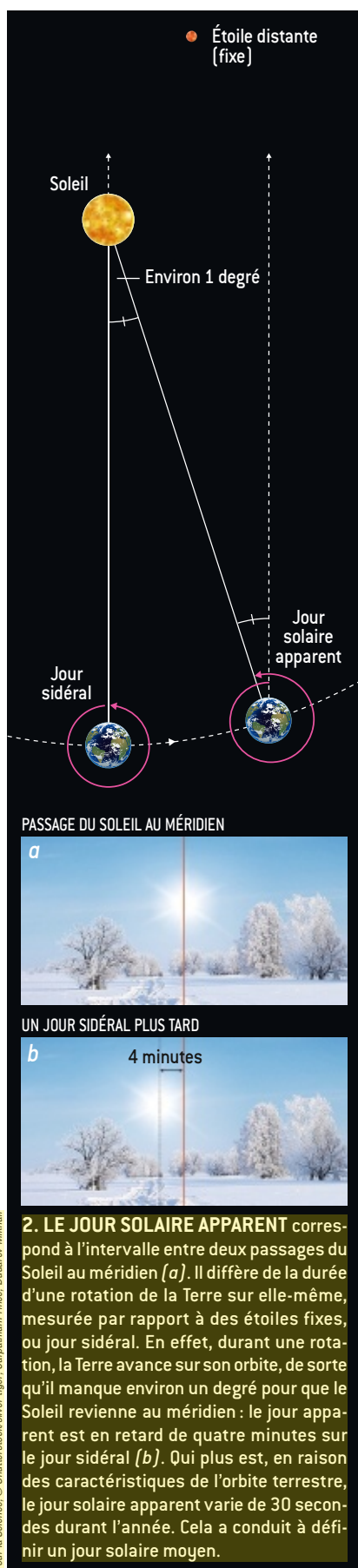
Le calendrier grégorien (365,2422 jours) est aujourd'hui utilisé dans le monde entier pour les usages officiels. L'islam utilise un calendrier purement lunaire comportant 12 mois de 29 ou 30 jours (une lunaison réelle dure 29,53 jours), soit en moyenne 354 jours. Il se décale donc chaque année de 11 jours par rapport au calendrier grégorien et aux saisons. D'autres systèmes dits luni-solaires, tel le calendrier chinois, maintiennent une proximité avec l'année tropique et les saisons en introduisant ponctuellement un mois lunaire intercalaire occasionnel. Certaines années ont ainsi 13 mois.

Ces calendriers nécessitent une table de conversion avec le calendrier grégorien pour les échanges internationaux. De façon plus générale, pour interpréter une date, il faut ainsi comprendre à la fois les règles du calendrier actuel et celles du calendrier utilisé à l'époque et dans la culture où s'est déroulé l'événement.

Des ajouts de jours ou de mois intercalaires sont par ailleurs inévitables dans tous les calendriers pour suivre l'année solaire réelle, et ces ajustements persisteront dans le futur.

Ajouter des secondes aux horloges

Les secondes intercalaires obéissent à une logique analogue à celle des jours et mois intercalaires, mais elles prennent leur sens à une échelle beaucoup plus fine. La précision des dispositifs de mesure actuels nous oblige à corriger les écarts infimes entre la durée de la rotation terrestre et le temps indiqué par les horloges atomiques. Cette synchronisation est obtenue en ajoutant des secondes intercalaires au Temps universel coordonné. Comment ces ajustements sont-ils définis



et appliqués ? Pour le comprendre, retraçons l'histoire du Temps universel.

Tandis que les calendriers comptent les jours, les horloges les divisent. Écoulements de sable ou d'eau, oscillation de pendules, vibration de cristaux ou raies d'émission d'atomes, des moyens de plus en plus élaborés ont été utilisés pour découper les durées en petites unités égales. Les civilisations antiques divisaient les jours et les nuits en 12 heures. Cette heure variable (car la durée entre le lever et le coucher du soleil varie avec la période de l'année et la latitude), dite temporaire, fut en usage jusqu'au Moyen Âge. Pour leurs calculs, les astronomes utilisaient quant à eux l'heure temporaire mesurée à l'équinoxe. La division des heures et des minutes en 60 sous-unités provient des fractions babyloniennes en base sexagésimale (60, un entier aisé à fractionner). Ainsi, pour le sens commun, un jour comporte 24 heures, une heure compte 60 minutes, et une minute, 60 secondes. L'acception traditionnelle de la seconde est ainsi $1/86\,400^e$ d'un jour.

Plusieurs définitions pour le jour

Cependant, plusieurs définitions astronomiques du jour coexistent. Le jour solaire apparent (ou vrai) est l'intervalle entre deux passages du Soleil au méridien du lieu (le demi-grand cercle sur la sphère céleste passant par les pôles célestes et le zénith). On peut le mesurer avec un simple cadran solaire. Cependant, en raison de l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre par rapport au plan de son orbite (écliptique), et de l'excentricité de celle-ci, le jour solaire apparent varie de plus ou moins 30 secondes au cours de l'année. Une illustration de ce phénomène est l'analemmе, la trajectoire en forme de 8 que semble décrire au fil de l'année le Soleil observé chaque jour au même moment (voir la figure 3).

Le jour sidéral correspond quant à lui à un tour de la Terre sur elle-même, mesuré par rapport à des étoiles fixes (voir la figure 2). Cette durée est plus uniforme, car elle ne dépend pas de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Comme la Terre avance sur son orbite durant sa rotation, le jour solaire apparent est, en moyenne, environ quatre minutes plus long que le jour sidéral.

Les variations de la durée du jour solaire apparent ont conduit dès l'Antiquité à définir le jour solaire moyen, d'une

durée uniforme, qui suit un Soleil « idéal », qui reviendrait au méridien au bout de 24 heures précises. C'est le temps solaire le plus adapté pour une utilisation des horloges civiles. L'écart du jour moyen par rapport au jour solaire apparent est régi par une relation nommée équation du temps (voir l'encadré ci-dessous).

Jusque dans les années 1960, la seconde fut ainsi définie comme le $1/86400^{\text{e}}$ du jour solaire moyen, fondé sur la rotation de la Terre sur elle-même. L'échelle de temps issue de cette définition est le « Temps solaire moyen de Greenwich » (GMT).

Rotation contre révolution

Cependant, la rotation de la Terre est légèrement irrégulière. Les positions de la Lune prédites en utilisant le temps solaire moyen étaient un peu incertaines. Par ailleurs, la Lune capte par le biais des marées une minuscule fraction du moment cinétique de la Terre, ce qui ralentit peu à peu la rotation de notre planète.

Or dès la fin du XIX^e siècle, Simon Newcomb, le directeur de l'*US Nautical Almanac Office*, qui publiait des données astronomiques nécessaires aux astronomes, aux géomètres et aux navigateurs, avait calibré la durée de l'année tropique avec une précision sans précédent. En faisant la moyenne des diverses petites variations sur la base d'observations astronomiques remontant jusqu'à 1750, il était arrivé à une équation très précise décrivant la position de la Terre autour du Soleil, et qui s'imposa rapidement comme une norme internationale.

Dans les années 1930, on fit la distinction entre le temps utilisé dans les équations de Newcomb, fondé sur la révolution de la Terre autour du Soleil, qualifié de Temps des éphémérides (TE), et le Temps moyen de Greenwich, fondé sur la rotation de la Terre.

La différence entre le Temps des éphémérides et le Temps de Greenwich peut être déduite de la différence entre la position observée de la Lune ou d'une planète et la position prédite par les tables

LES AUTEURS

David FINKLEMAN est chercheur au Centre pour les normes spatiales et l'innovation de la Société *Analytical Graphics* et coordinateur du groupe de travail des opérations spatiales de l'Organisation internationale de normalisation.

Steve ALLEN est programmeur et analyste à l'Observatoire Lick de l'Université de Californie.

John SEAGO est ingénieur en astrodynamique pour la Société *Analytical Graphics*.

Rob SEAMAN est ingénieur informaticien à l'Observatoire national d'astronomie optique américain.

Kenneth SEIDELMANN est professeur d'astronomie à l'Université de Virginie et ancien directeur de l'astrométrie à l'Observatoire naval américain.

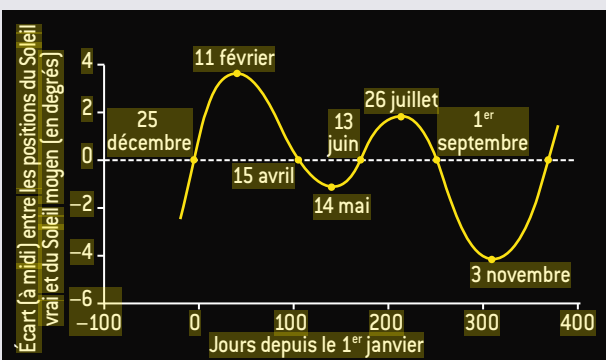
Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

L'équation du temps

Le temps solaire « vrai », l'échelle de temps liée au Soleil que l'on observe et qui est mesurée par les cadrans solaires, traduit à la fois le mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil et son mouvement de rotation sur elle-même.

Cependant, ce temps n'est pas régulier. L'intervalle de temps entre deux passages consécutifs du Soleil « vrai » au méridien, nommé jour solaire vrai, varie entre 23 h 59 min 39 s et 24 h 00 min 30 s. Par exemple, à Paris, le 1^{er} janvier 2012 a duré 24 h 00 min 28 s, mais le 1^{er} septembre durera 23 h 59 min 40 s.

Il y a deux raisons essentielles à cette non-uniformité. D'une part, le mouvement apparent du Soleil dans le ciel ne décrit pas l'équateur céleste (projection de l'équateur terrestre et plan de référence pour la mesure du temps, car 24 heures correspondent à 360 degrés), mais un grand cercle nommé écliptique, incliné de 23° 26' en raison de l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite. Ainsi, lorsque le Soleil se déplace par



exemple de un degré sur l'écliptique, sa projection sur l'équateur mesure un peu moins d'un degré.

D'autre part, en vertu de la deuxième loi de Kepler, la Terre se déplace plus vite lorsqu'elle est proche du Soleil (en hiver pour l'hémisphère Nord) et moins vite lorsqu'elle est loin.

Les astronomes ont donc défini, dès l'Antiquité (au moins dès Ptolémée, au II^e siècle de notre ère), un jour solaire moyen, qui correspond au retour d'un Soleil idéal, appelé Soleil moyen, au méridien du lieu après exactement 24 heures. Au fil des jours,

le retard ou l'avance du Soleil vrai par rapport au Soleil moyen s'accumule. La relation entre le temps solaire vrai et le temps solaire moyen, qui tient compte des deux effets décrits précédemment, est nommée équation du temps.

L'écart peut atteindre -16 minutes début novembre et +14 minutes en février : le Soleil vrai passe alors au méridien 14 minutes après le Soleil moyen.

À l'inverse, l'équation du temps s'annule quatre fois par an. Le temps solaire moyen coïncide alors avec le temps solaire vrai.

C'est vers le solstice d'hiver que les jours solaires vrais (intervalle entre deux passages au méridien) sont les plus longs, et vers l'équinoxe d'automne qu'ils sont les plus courts.

Le temps civil d'un lieu est le temps solaire moyen de ce lieu augmenté de 12 heures, de sorte qu'il soit égal à 00 h au milieu de la nuit. Ainsi le Temps universel UT est le temps solaire vrai du méridien de Greenwich, corrigé de l'équation du temps, plus 12 heures.

En fait, on a négligé ici dans l'équation du temps des termes de second ordre qui décrivent les variations de la rotation de la Terre dues à des termes périodiques saisonniers, des fluctuations irrégulières imprévisibles et le ralentissement séculaire dû aux marées. Ce sont toutes ces inégalités qui ont conduit à abandonner le Temps universel au profit d'échelles de temps plus uniformes.

Denis Savoie

Directeur du Département d'astronomie et du planétarium au Palais de la Découverte, Paris