

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 $1/86400^{\circ}$ 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.

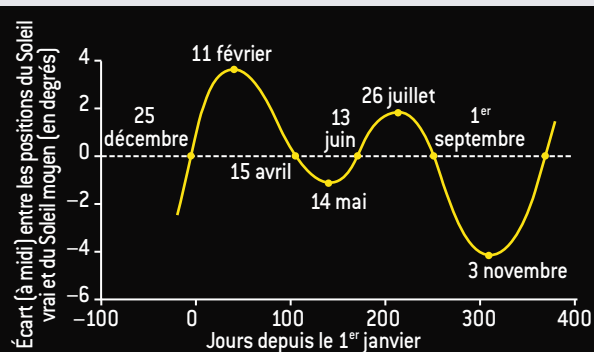
Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

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 de 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.

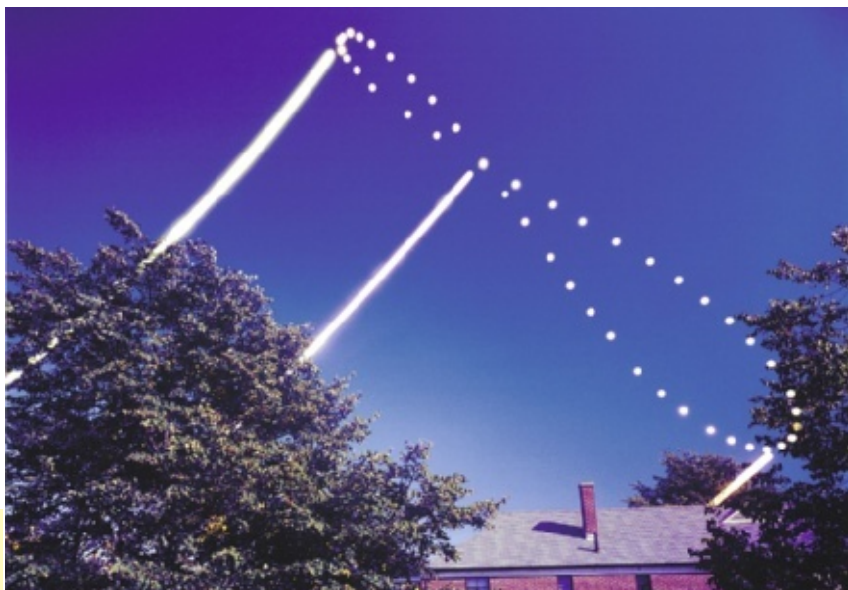
C'est vers le solstice d'hiver que les jours solaires vrais (intervalle entre deux passages au méridien) sont les plus longs, et vers l'équinoxe d'automne qu'ils sont les plus courts.

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



3. L'ANALEMME ILLUSTRE LA VARIATION DU JOUR SOLAIRE APPARENT. En raison de l'obliquité de la Terre et de son orbite elliptique, le Soleil, observé chaque jour du même lieu à la même heure, ne revient pas exactement au même point : il décrit ainsi en une année une courbe en forme de huit. Dennis di Cicco, du magazine *Sky & Telescope*, a réalisé cette toute première photographie de l'analemma entre février 1978 et février 1979 (les traits correspondent à la trajectoire du Soleil depuis son lever, à trois dates distinctes).

Glossaire

- ✓ **JOUR SOLAIRE VRAI** : intervalle entre deux passages successifs du Soleil au méridien.
- ✓ **JOUR SOLAIRE MOYEN** : jour solaire vrai corrigé des variations induites par les caractéristiques orbitales de la Terre. Il vaut exactement 24 heures.
- ✓ **TEMPS UNIVERSEL (UT)** : échelle de temps fondée sur le jour solaire moyen. Jadis appelé Temps moyen de Greenwich (GMT), sa version la plus précise est nommée UT1. Le Temps universel est légèrement variable à court terme, et ralentit à long terme.
- ✓ **TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL (TAI)** : échelle de temps fondée sur l'écoulement des secondes du Système international, calibrées par la fréquence d'un rayonnement de l'atome de césium 133. C'est le temps le plus régulier qu'on ait défini.
- ✓ **TEMPS UNIVERSEL COORDONNÉ (UTC)** : échelle de temps qui suit le Temps atomique et qui est synchronisée avec le Temps universel par l'ajout de secondes intercalaires. C'est la base du temps civil.

de Newcomb. Cette conversion est néanmoins lente et fastidieuse, au point que Gerald Clemence, lui aussi à l'*US Naval Almanac Office*, déclara en 1948 que le Temps des éphémérides était destiné aux astronomes et autres scientifiques, tandis qu'il était logique de continuer à utiliser le Temps solaire moyen (le Temps universel) pour les besoins civils.

En 1960, pourtant, on décida de fonder l'unité de temps du Système international (la seconde) sur le Temps des éphémérides, et non plus sur le Temps moyen de Greenwich, renommé à l'occasion Temps universel (UT). La seconde fut ainsi définie comme une fraction de l'année tropique. La constance de cette unité était parfaitement adaptée aux théories du Système solaire ou à l'étalonnage des fréquences électromagnétiques.

L'avènement du Temps atomique

Mais déjà à cette époque, les horloges atomiques étaient capables de mesurer très précisément des durées. En 1958, Louis Essen, du *National Physical Laboratory* en Angleterre, et William Markowitz, de l'*US Naval Observatory*, avaient déterminé la fréquence du rayonnement émis lors de la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'atome de césium 133, qui corres-

pondait le mieux à la durée de la seconde des éphémérides. Et en 1967, la seconde des éphémérides fut abandonnée par le Système international au profit d'une seconde fondée sur cette fréquence atomique. En quelques années, l'écoulement des secondes atomiques, établi et coordonné par le Bureau international des poids et mesures, à Sèvres, devint le Temps atomique international (TAI).

De nombreuses applications scientifiques et techniques dépendent de la durée parfaitement constante des secondes atomiques du Système international. Pour autant, il n'y a jamais exactement 86 400 secondes atomiques dans un jour solaire du Temps universel. La différence n'est que de quelques millisecondes par jour, mais la mesure du temps avec des horloges atomiques conduit à une échelle de temps sensiblement différente du Temps universel. En d'autres termes, le Temps universel dérive par rapport au Temps atomique international.

Or la plupart des lois, des usages et des technologies définissent la mesure du temps civil par le Temps universel. De même, les observations astronomiques et les missions spatiales imposent l'utilisation du Temps universel, qui suit la rotation de la Terre.

Garder le lien avec le Temps universel

Comment dès lors concilier le temps astronomique et le temps atomique ? La première solution, en vigueur durant les années 1960, a été d'introduire des « sauts » de moins de 0,1 seconde et des secondes de longueur variable par rapport aux étalons atomiques dans les signaux radio qui diffusaient le Temps universel (l'équivalent de dix secondes a ainsi été ajouté au Temps universel). Mais cette pratique compliquait la mesure d'un intervalle de temps précis ou l'étalonnage des fréquences électromagnétiques, car la durée d'une seconde du Temps universel variait par rapport aux étalons atomiques de fréquence.

En 1972, on a abandonné ce système au profit de secondes intercalaires et défini le Temps universel coordonné (UTC). Ce concept a été précisé par l'Union astronomique internationale (UAI) et défini officiellement par le Comité consultatif international de radiocommunication (CCIR), un précurseur de l'ITU-R.

Des secondes intercalaires entières maintiennent la relation entre le Temps

atomique international, immuable, et une version du Temps universel fondée sur la rotation – pas tout à fait constante – de la Terre mesurée par rapport à des sources radio lointaines, appelée UT1 (l'UT1 et l'UT diffèrent de moins d'une seconde à tout moment).

L'insertion d'une seconde intercalaire est décidée quand l'écart entre l'UT1 et l'UTC va dépasser 0,9 seconde. Une seconde intercalaire est alors ajoutée à l'UTC, et affichée comme 23 h 59 min 60 s, ce qui accroît la durée d'un jour UTC tout en maintenant un marquage du temps continu et sans ambiguïté. Cet ajout est prévu six mois à l'avance et toujours à la dernière seconde du dernier jour d'un mois (en pratique, juin ou décembre ; la prochaine sera ajoutée en juin 2012).

À ce jour, 24 secondes intercalaires ont été introduites. Elles sont insérées simultanément dans le monde entier. Elles apparaissent ainsi plus tôt ou plus tard en temps local pour chaque fuseau horaire, par rapport au méridien de Greenwich.

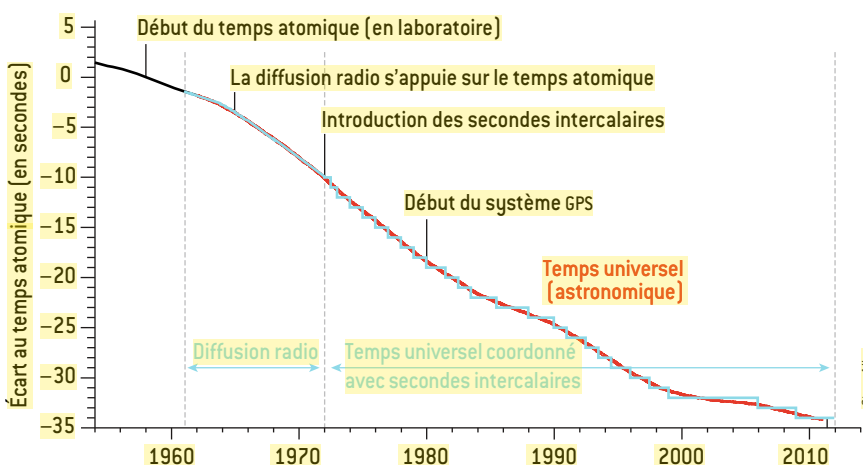
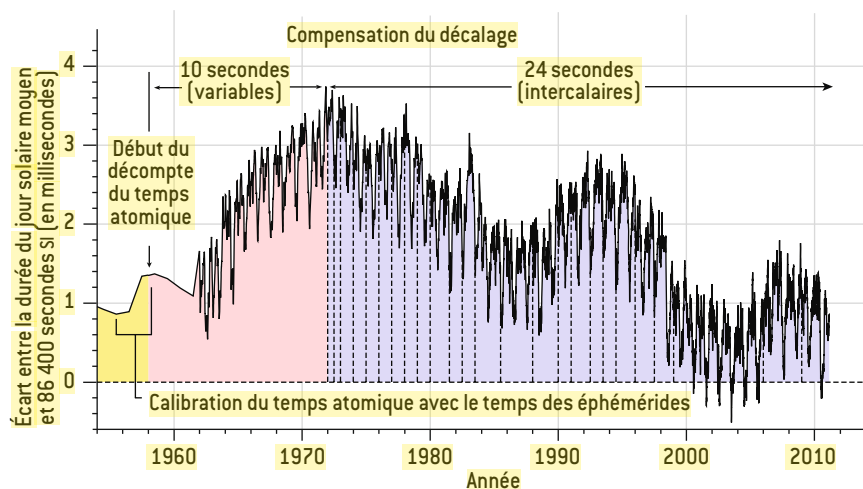
Qui définit le temps ?

Qui établit le Temps universel coordonné ? En fait, cette responsabilité est partagée entre différents organismes. Comme évoqué, le Temps atomique international est établi par le Bureau international des poids et mesures, à Sèvres. Le Service international de rotation de la Terre (IERS), à l'Observatoire de Paris, détermine pour sa part quand il faut ajouter une seconde intercalaire en surveillant la rotation de la Terre avec une extrême précision. Mais historiquement, quand l'UTC a été institué, les émissions radio en ondes courtes étaient le principal moyen de transmission en temps réel, si bien que le secteur radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (ITU-R) devint responsable du maintien du Temps universel coordonné. Cette institution, simple instance de contrôle administratif, n'est pourtant en rien impliquée dans le développement de l'échelle de temps (par ailleurs, l'UTC peut aujourd'hui être obtenu, avec différents niveaux de fidélité, par de nombreux autres moyens : système de géolocalisation mondial ou GPS, satellites de télécommunications ou météorologiques, ou encore protocoles de minutage d'Internet).

La plupart des gens ignorent tout du Temps universel coordonné et pen-

sent qu'un jour est exactement égal à $24 \times 60 \times 60$ secondes, comme on l'apprend depuis l'enfance. Même les concepteurs de logiciels et les fabricants de matériel informatique ne connaissent pas toujours le problème des secondes intercalaires, ou l'ignorent purement et simplement.

Cette méconnaissance est en règle générale sans conséquences. Il y a très peu d'applications qui nécessitent réellement de déterminer le temps relativement à l'UTC à la seconde près. En particulier, nos ordinateurs sont de mauvaises horloges : ils se décalent jusqu'à plusieurs minutes par jour ! La plupart sont programmés pour se synchroniser avec une horloge externe. De nombreux dispositifs en réseau négligent l'insertion de secondes intercalaires



4. LE TEMPS UNIVERSEL DÉFINI PAR LA ROTATION DE LA TERRE n'est pas constant, comme l'illustre le graphique du haut, qui montre la différence entre un jour de 86 400 secondes indiquées par les horloges atomiques et la durée du jour solaire moyen. Le graphique du bas montre l'écart entre le Temps universel coordonné (courbe bleue) et le temps atomique, ainsi que les 24 secondes intercalaires ajoutées depuis 1972 pour conserver la synchronisation avec le Temps universel (courbe rouge). Si l'on ajoute 10 secondes variables comme auparavant, le Temps universel coordonné est en retard sur le Temps atomique international de 34 secondes.

et tolèrent une dérive du temps entre les différents composants, jusqu'à ce que l'horloge globale du réseau soit remise à l'heure par une synchronisation d'ensemble. Les secondes intercalaires n'ont pas d'incidence – ni en bien ni en mal – pour de telles applications.

En revanche, les secondes intercalaires peuvent poser des problèmes aux systèmes qui nécessitent une synchronisation précise, mais qui ne sont pas conçus pour les traiter. Dans certains systèmes informatiques répartis, le partage de données séquentielles par paquets pourrait par exemple être perturbé si des composants du réseau ignorent les secondes intercalaires.

Une partie du problème vient du système de notification. L'annonce officielle de l'ajout d'une seconde intercalaire est publiée dans le bulletin C de l'IERS. Les ingénieurs doivent ensuite traduire cette information en une forme compréhensible par les différents systèmes informatiques. Certains systèmes comme le GPS diffusent l'in-

formation sur les secondes intercalaires à venir peu après leur annonce, soit près de six mois avant leur application. Un récepteur GPS pourrait ainsi être la méthode la plus fiable et la plus pratique pour être informé de façon automatique des secondes intercalaires à venir. Cependant, le temps indiqué par le système GPS ne tient pas compte des secondes intercalaires et est actuellement en avance de 15 secondes sur l'UTC, ce qui complique certaines applications spatiales.

Plus de contraintes que d'avantages ?

L'Institut américain des étalons et de la technologie (le NIST) diffuse en ondes courtes les notifications de seconde intercalaire jusqu'à 30 jours à l'avance. Certains protocoles pour les dispositifs en réseaux n'avertissent qu'une minute à l'avance, ce qui peut se révéler trop tardif, par exemple si la mise à jour n'est pas automatisée.

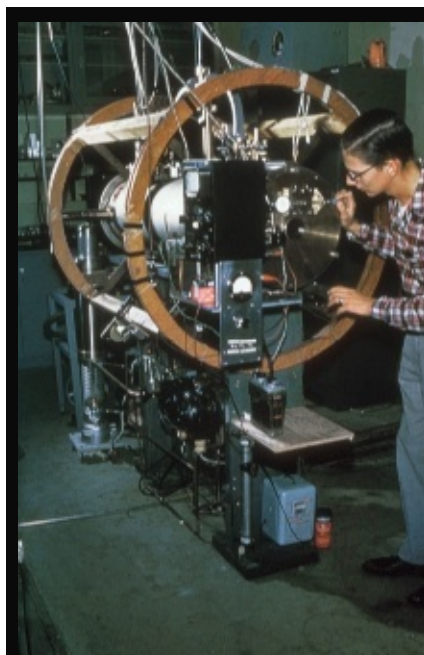
L'affichage des secondes intercalaires est un autre problème du Temps universel coordonné. Si les horloges analogiques ne peuvent pas s'adapter à une minute de 61 secondes, en théorie, les horloges numériques et les logiciels le peuvent. Utiliser une seconde intercalaire « négative » (pour passer de 23 : 59 : 58 à 00 : 00 : 00) serait encore plus simple. En pratique, le manque de matériel informatique et de circuits électroniques bon marché permettant de gérer l'ajout d'une seconde intercalaire – en affichant par exemple 23 : 59 : 60 – a conduit à des moyens très divers et peu conventionnels pour représenter l'UTC à l'approche d'une seconde intercalaire. Cela peut aussi poser des problèmes pour la synchronisation des horloges d'ordinateurs.

Quand l'UTC avec ses secondes intercalaires a été introduit, au début des années 1970, il apportait une commodité et des avantages certains pour l'industrie des télécommunications. Trente ans plus tard, les secondes intercalaires sont beaucoup moins appréciées, en raison des problèmes que nous venons d'évoquer. C'est pourquoi l'ITU-R a décidé en 2001 de réétudier cette question. Après réflexion, un groupe de recherche de cette institution a recommandé l'abandon des secondes intercalaires, tout en conservant l'appellation de Temps universel coordonné.

L'Assemblée des radiocommunications de l'ITU-R s'est réunie à Genève en janvier 2012 pour voter pour ou contre la suppression des secondes intercalaires d'ici 2018. À l'heure où ces lignes sont écrites, nous ignorons le résultat du vote. Mais si cette proposition était approuvée, le Temps universel coordonné cessera d'être synchronisé avec le Temps universel, c'est-à-dire avec le temps solaire, pour suivre une échelle parallèle au temps atomique.

Que se passera-t-il alors ? Le principal avantage de l'abrogation des secondes intercalaires serait que les systèmes qui n'exploitent pas le temps astronomique n'auront plus d'efforts à faire pour se tenir à jour, traiter et afficher ces secondes. Cela entraînerait une simplification notable pour les télécommunications et certains systèmes de navigation électroniques, tels le GPS.

En revanche, tous ceux qui travaillent avec des informations historiquement datées seront pénalisés. Par ailleurs, certaines missions spatiales et autres applications astronomiques devront prendre garde à distinguer le Temps universel coor-



5. LA PREMIÈRE MESURE ATOMIQUE
du temps, via la fréquence d'un rayonnement du césium 133, a été réalisée en 1952 avec l'instrument NBS-1 (ci-dessus) du NIST, l'Institut américain des normes et de la technologie. L'étalon actuel du temps civil et des fréquences des États-Unis est mesuré avec une précision de une seconde pour 100 millions d'années par l'instrument NIST-f1 (à droite).

