



✓ QU'EST-CE QU'UNE GALAXIE ?

Dans l'article sur le gauchissement de la Voie lactée (*Le côté obscur de la Voie lactée*, *Pour la Science* n° 410, décembre 2011, http://bit.ly/410_blitz), Leo Blitz évoque des galaxies satellites si peu lumineuses qu'elles n'abriteraient aucune étoile, voire pas de gaz ! Peut-on encore parler de galaxies ? Tout comme le sens du mot « planète » a été modifié récemment, la définition des galaxies ne doit-elle pas évoluer ?

Jacques Prestreau

→ RÉPONSE DE BENOÎT FAMAËY, Observatoire de Strasbourg

Vous avez raison, on ne peut pas se contenter simplement de définir une galaxie comme un assemblage d'étoiles, de gaz, de poussières.

La meilleure définition d'une galaxie à l'heure actuelle est sans doute celle d'un système stellaire gravitationnellement lié et non collisionnel. Une dynamique non collisionnelle signifie que le temps caractéristique pour que les rencontres entre les étoiles proches aient une influence est plus long que l'âge de l'Univers. À l'inverse, la dynamique est dite collisionnelle lorsque ces rencontres entraînent des changements significatifs de direction.

Ce critère permet de distinguer les galaxies des amas globulaires, dont la dynamique est collisionnelle. On peut néanmoins réintégrer dans le club des galaxies les objets à la dynamique collisionnelle, mais dominés par un halo de matière noire : en effet, les amas globulaires ne sont pas censés posséder un tel halo.

Toutefois, une définition uniquement fondée sur la présence de matière noire aurait l'inconvénient d'éliminer certaines galaxies supposées sans matière noire, mais dont la dynamique est clairement non collisionnelle, et qui sont bien identifiées comme galaxies. Quant aux hypothétiques « galaxies noires » sans étoiles ou sans gaz, il est à ce stade plus judicieux de ne pas les inclure dans la définition. Leur éventuelle détection relancerait bien sûr le débat terminologique. Pour plus

d'informations, on peut se référer à l'article <http://arxiv.org/abs/1101.3309>.

✓ LES PARADOXES DE L'OMNISCIENCE

L'article de Jean-Paul Delahaye sur l'omniscience (*La logique de la perfection*, *Pour la Science* n° 410, décembre 2011, http://bit.ly/410_delahaye) a suscité de nombreuses réactions. Voici les principales.

1. Dans le jeu illustrant le paradoxe de Newcomb, le premier raisonnement qui conduit à n'ouvrir que la boîte A contenant 1 000 euros est cohérent avec l'hypothèse que l'individu qui propose le jeu est omniscient. Cependant, le second raisonnement, qui conduit à ouvrir les deux boîtes A et B et offre l'espoir d'un gain de 1001 euros, alors que le gain prédit par l'être omniscient doit se limiter à 1 euro, repose sur l'hypothèse inverse, c'est-à-dire qu'il ne peut exister d'être omniscient.



Il est normal que des raisonnements partant de deux hypothèses contraires aboutissent à des conclusions inverses, et cela ne prouve pas l'impossibilité d'un être omniscient.

2. Dans le paradoxe de Moore, comment une personne peut-elle dire à la fois qu'elle connaît la vérité d'une affirmation et qu'elle ne connaît pas l'affirmation elle-même ? N'est-ce pas dépourvu de sens ? Si on fait la distinction entre « connaître la proposition » et « connaître que la proposition est vraie », alors la conclusion du raisonnement n'est pas une contradiction. Les mêmes remarques s'appliquent au paradoxe de Fitch.

3. L'omniscience est-elle un handicap ? Dans le cas du jeu où deux voitures foncent vers un précipice et le conducteur qui saute en dernier gagne, l'omniscience est un avantage plutôt qu'un inconvénient. En effet, elle permet de gagner chaque fois que l'on sait que son adversaire n'ira pas jusqu'au bout. Et face à un adversaire dont on sait qu'il préfère mourir que de perdre, personne ne peut gagner, y compris un être omniscient.

→ RÉPONSES DE JEAN-PAUL DELAHAYE

1. Dans le paradoxe de Newcomb, le second raisonnement ne demande aucune supposition sur l'être prétendu omniscient. Le joueur peut ne pas croire que la personne qui propose le jeu est omnisciente. Le raisonnement utilise seulement la propriété toujours vraie que le contenu de la boîte A plus celui de la boîte B vaut toujours plus que celui de la boîte A seule. Cette conclusion contradictoire avec celle du premier raisonnement prouve donc, par l'absurde, qu'une des hypothèses est fautive, en l'occurrence l'existence d'un individu omniscient. Pour plus de détail sur l'impossibilité de Newcomb, voir : http://en.wikipedia.org/wiki/Newcomb's_paradox

2. La formule discutée dans le paradoxe de Moore, « connu (p et non connu p) », où p est une proposition, n'est pas dépourvue de sens. Elle signifie quelque chose de précis. Si par exemple p est la proposition « il pleut », dire « il pleut et je ne sais pas qu'il pleut » a un sens et peut être vrai ou faux. Si cette phrase est notée P , dire « je sais P » a donc aussi un sens. Il se trouve que c'est contradictoire, comme le montre la première partie du raisonnement. Le paradoxe de Fitch soulève une vraie difficulté que je vous invite à explorer en regardant <http://plato.stanford.edu/entries/fitch-paradox/>.

3. Dans le cas du jeu des voitures, l'omniscience peut bien être un handicap. En effet, par exemple, face à un être omniscient, une façon de jouer est de se bander les yeux et de foncer vers le vide. L'être omniscient sait qu'ainsi vous ne céderez pas, et sautera donc le premier.

Temps universel : faut-il supprimer les secondes intercalaires ?

David Finkleman, Steve Allen, John Seago, Rob Seaman et Kenneth Seidelmann

Le temps indiqué par les horloges a toujours été calé d'une façon ou d'une autre sur les mouvements de la Terre et du Soleil. Mais cette référence astronomique pourrait être abandonnée.

L'ESSENTIEL

✓ Le décompte du temps s'appuie depuis toujours sur la rotation de la Terre et sa révolution autour du Soleil.

✓ Le Temps universel, fondé sur ces mouvements célestes, est la base du temps légal. Mais il n'est pas assez uniforme, à l'inverse du temps indiqué par les horloges atomiques.

✓ Le Temps universel coordonné relie l'un à l'autre par l'ajout de secondes intercalaires, ce qui pose quelques difficultés techniques.

✓ Certaines instances proposent de supprimer les secondes intercalaires. Cela reviendrait à affranchir le temps légal du mouvement des astres.

Pour la Science © Shutterstock/Igorale

« Depuis des temps immémoriaux, les moyens utilisés universellement pour marquer le passage du temps sont les mouvements apparents des corps célestes ; et la mesure du temps, que ce soit par les heures du jour et de la nuit ou par les intervalles plus longs impliqués dans les calculs calendaires et chronologiques, dépend encore des mouvements célestes. D'autres moyens, comme les horloges, ne sont que des auxiliaires ou des intermédiaires. »

Ces propos des astronomes américains Edgar Woolard et Gerald Clemence datent de 1966, c'est-à-dire hier à l'échelle de l'histoire de la mesure du temps par l'homme. Mais ce qui était alors une vérité intangible – le temps civil est *in fine* fondé sur le mouvement des corps célestes – pourrait bientôt être remis en cause. Un organisme des Nations unies, le secteur radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (ITU-R), pourrait briser définitivement ce lien en adoptant une nouvelle définition du Temps universel coordonné (UTC).

Le Temps universel coordonné est le successeur moderne du Temps moyen de Greenwich, ou GMT (*Greenwich mean time*).

Depuis 1972, c'est la base du temps légal dans la plupart des pays du monde. Il est établi par un décompte des secondes du Système international (SI). Or cette unité est définie comme la durée de 9 192 631 770 périodes du rayonnement émis par la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133, phénomène physique complètement indépendant de la rotation de la Terre ou de tout autre phénomène céleste.

Auparavant réglées sur les mouvements célestes, les horloges civiles sont ainsi aujourd'hui calées sur le temps des horloges atomiques. Cependant, la durée du jour solaire, définie par la rotation de la Terre sur elle-même, est un peu plus longue que celle du jour définie par le décompte des secondes atomiques. C'est pourquoi des secondes intercalaires sont ajoutées de façon ponctuelle aux flux du temps atomique pour conserver la synchronisation du Temps universel coordonné avec la durée réelle de la rotation de la Terre. Ces secondes intercalaires sont un moyen *ad hoc* de concilier deux mesures du temps fondamentalement différentes, mais toutes deux utiles.

L'ITU-R propose aujourd'hui d'abandonner l'insertion des secondes intercalaires, c'est-à-dire de caler le Temps universel coordonné sur le Temps atomique, et non plus sur le temps déduit des mouvements célestes. Ce bouleversement aurait des

implications scientifiques et techniques, mais aussi légales et philosophiques. Le mot *jour* conservera-t-il son sens originel, c'est-à-dire « la durée d'une rotation de la Terre autour de son axe » ou signifiera-t-il « la durée de 794 243 384 928 000 périodes de l'émission du césium 133 » ? Faut-il définitivement renoncer à suivre la rotation de la Terre pour mesurer le temps ? Et en quoi ce changement de définition serait-il utile et souhaitable ? Examinons cette situation sans précédent.

Ajouter des jours aux calendriers

Un calendrier est un système permettant de définir la suite des jours sur de longues périodes de façon cohérente avec les cycles lunaires et solaires. La durée moyenne d'un jour solaire n'est pas un diviseur exact des périodes orbitales de la Terre ou de la Lune. En d'autres ter-

mes, l'année ne dure pas exactement 365 jours, ni le mois lunaire 29 jours. Ainsi, les saisons se décaleraient progressivement au fil des ans si les calendriers n'étaient pas régulièrement ajustés.

Les civilisations antiques avaient compris qu'une révolution de la Terre autour du Soleil, ou année tropique, dure approximativement 365,25 jours. C'est pourquoi le calendrier établi en 45 avant notre ère par Jules César, le calendrier julien, comportait un jour intercalaire supplémentaire tous les quatre ans (année bissextile).

Nous savons aujourd'hui que l'année tropique est un peu plus courte : 365,2422 jours en moyenne. En s'accumulant, ce léger écart de 0,002 pour cent avait fini par décaler le calendrier julien de dix jours par rapport à la course réelle du Soleil lorsque le pape Grégoire XIII s'attaqua au problème, au XVI^e siècle ! Pour rattraper cet écart, on décréta que le vendredi 15 octobre 1582 suivrait directement

1. LES SECONDES INTERCALAIRES

sont ajoutées à la fin du dernier jour de certains mois. La dernière minute vaut alors 61 secondes. Cet usage va-t-il être supprimé ?



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.

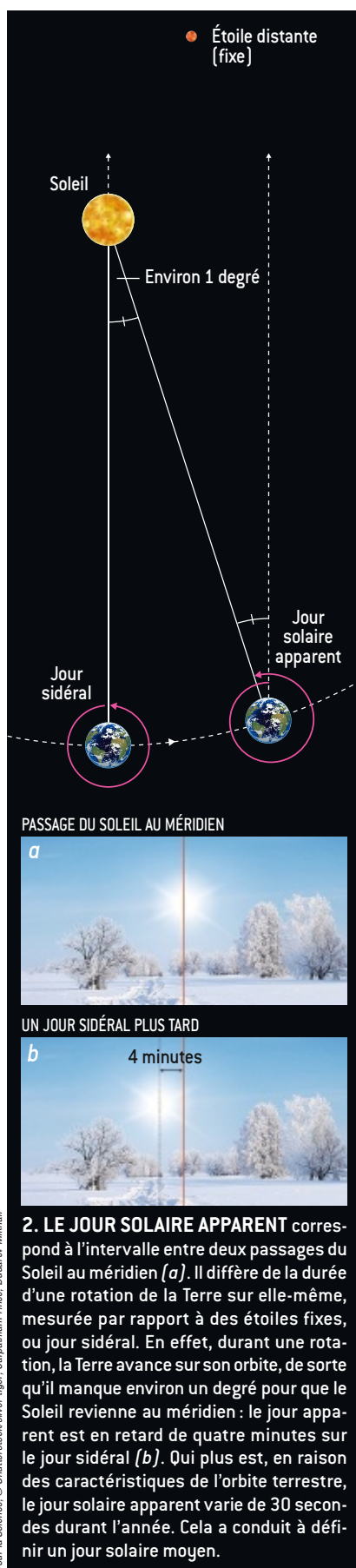
Le calendrier grégorien (365,2422 jours) est aujourd'hui utilisé dans le monde entier pour les usages officiels. L'islam utilise un calendrier purement lunaire comportant 12 mois de 29 ou 30 jours (une lunaison réelle dure 29,53 jours), soit en moyenne 354 jours. Il se décale donc chaque année de 11 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'analemmé, 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 $1/86400^e$ 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.

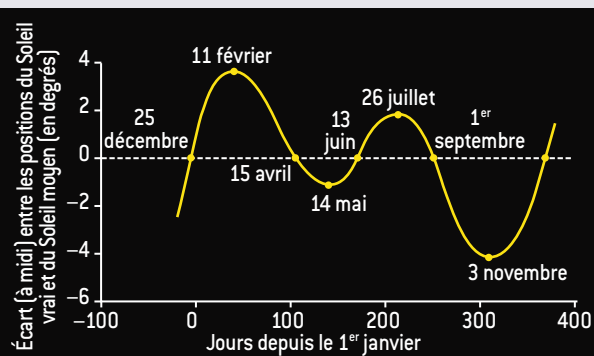
Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

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 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.

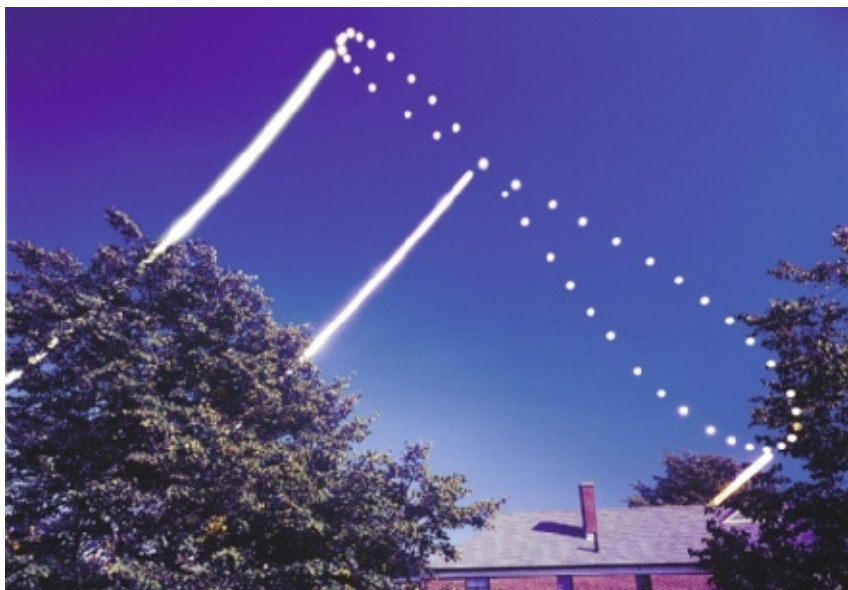
C'est vers le solstice d'hiver que les jours solaires vrais (intervalle entre deux passages au méridien) sont les plus longs, et vers l'équinoxe d'automne qu'ils sont les plus courts.

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.

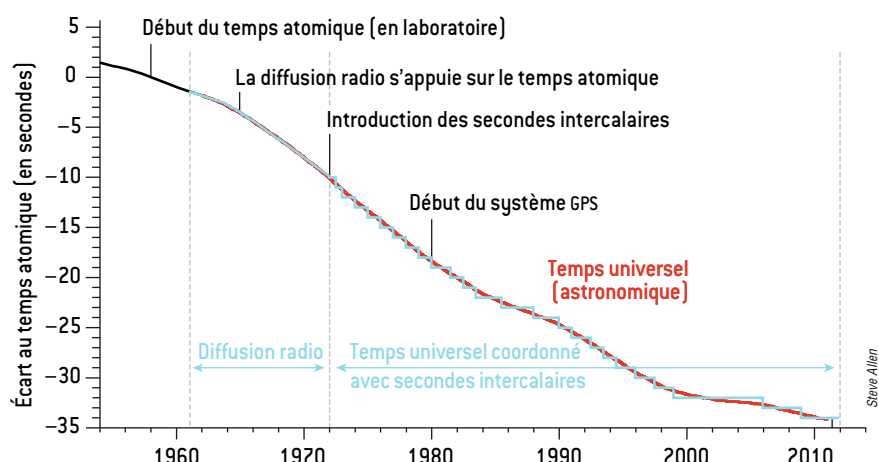
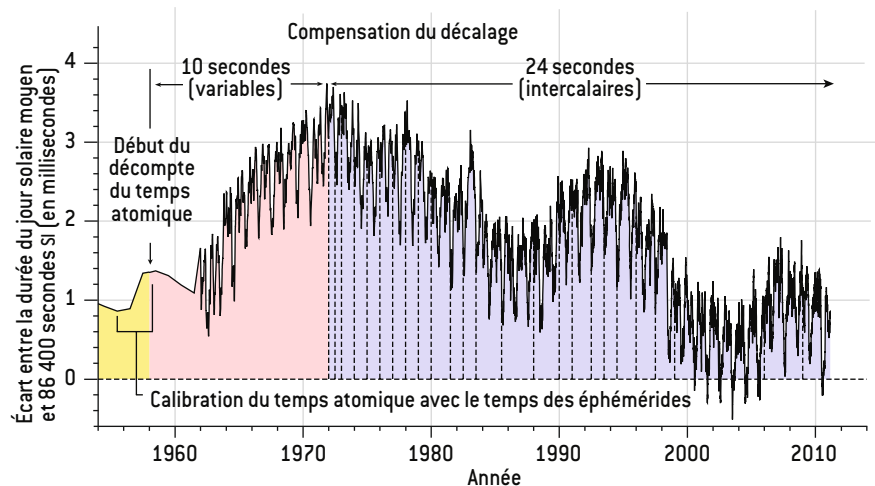
Qui définit le temps ?

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.

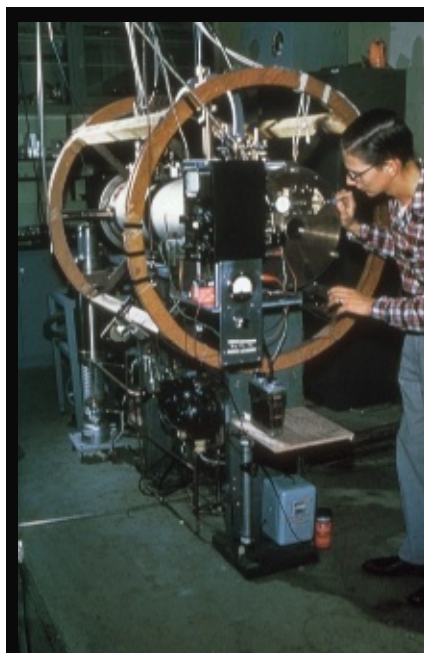
L'affichage des secondes intercalaires est un autre problème du Temps universel coordonné. Si les horloges analogiques ne peuvent pas s'adapter à une minute de 61 secondes, en théorie, les horloges numériques et les logiciels le peuvent. Utiliser une seconde intercalaire « négative » (pour passer de 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).



donné sans secondes intercalaires et le Temps universel.

L'abandon des secondes intercalaires perturberait aussi les horloges et les dispositifs de télécommunication où la gestion des secondes intercalaires est intégrée. Des changements statutaires et réglementaires seraient également nécessaires dans les législations nationales, pour lesquelles le temps astronomique est l'étalon explicite ou implicite.

À plus long terme, sans secondes intercalaires, l'écart entre l'UTC, calé sur le temps atomique, et l'UT1, fondé sur le rythme réel du jour et de la nuit, va continuer à croître. L'heure officielle et l'heure vraie indiquée par les mouvements du Soleil vont lentement se décaler. En poussant à l'extrême, si rien n'est fait, il sera un jour midi à minuit, et la date du jour changera en plein milieu de la journée!

Des ajustements encore plus conséquents que les secondes intercalaires, mais plus espacés – des minutes ou des heures intercalaires – seront ainsi indispensables. Il n'est pas *a priori* évident que ces ajustements soient plus faciles à mettre en œuvre que les secondes intercalaires.

Le ciel, gardien du temps

Certes, aucun système de décompte du temps ne peut durer indéfiniment. Même le calendrier grégorien nécessitera un jour des ajustements par l'ajout de jours intercalaires exceptionnels, ou cédera la place à un calendrier plus précis, car ses règles ne sont elles aussi que des approximations des relations astronomiques réelles.

De même, dans sa forme actuelle, le Temps universel coordonné ne fonctionnera plus dans un millier d'années : à cette époque, pour le synchroniser avec le Temps universel, il faudra plus de secondes intercalaires qu'il n'y a de mois où les ajouter ! En effet, si la durée du jour solaire a en moyenne raccourci ces dernières années en raison de phénomènes géophysiques internes à notre planète, sur le long terme, le jour solaire va s'accroître de quelques millisecondes chaque siècle, à cause des forces de marée exercées par la Lune. La durée actuelle du jour astronomique est d'environ 86 400,001 secondes. Nous avons donc besoin d'une seconde intercalaire tous les deux à trois ans. Dans 50 000 ans, le jour astronomique vaudra environ 86 401 secondes. Avec le système actuel,



6. LE TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL est établi par le Bureau international des poids et mesures (BIPM), situé à Sèvres, près de Paris, à partir des mesures de plus de 300 horloges atomiques réparties dans le monde entier (points rouges). L'insertion des secondes intercalaires pour maintenir le temps atomique à moins de 0,9 seconde du Temps universel, réglé sur la rotation de la Terre, est décidée par l'ERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*), hébergé à l'Observatoire de Paris.

une seconde intercalaire serait alors nécessaire chaque jour !

Il est intéressant d'imaginer comment les générations futures s'adapteront à cette situation. Comme toute technologie, les horloges en disent beaucoup sur les civilisations. Mais le décompte du temps est un problème actuel et continuera à l'être durant les décennies et les siècles à venir. Nous aurons toujours besoin de distinguer la nuit du jour, de diviser nos journées en heures et de fixer la date des événements importants.

Il n'existe pas de consensus dans les milieux industriels et universitaires, ni dans les instances gouvernementales sur la modification du Temps universel coordonné et la suppression des secondes intercalaires. Mais si nous brisons le lien entre le temps et les cycles astronomiques, nous ne sommes pas certains de pouvoir le renouer un jour. Même si les secondes intercalaires étaient supprimées, le problème sous-jacent – comment concilier l'avance constante du temps atomique sur le temps astronomique – ne disparaîtra jamais. En outre, l'UTC reste la base légale du décompte du temps civil dans la plupart des pays ; c'est une convention qui ne devrait pas être modifiée par caprice. Les délibérations de l'ITU-R résoudront-elles ou amplifieront-elles ces problèmes ? Seul... le temps nous le dira. ■

✓ SUR LE WEB

Site de l'ITU :
<http://www.itu.int/home/>

Site du BIPM : <http://www.bipm.fr/>

Site de l'ERS :
<http://hpiers.obspm.fr/>

✓ BIBLIOGRAPHIE

D. Savoie, **Vers une nouvelle échelle de temps ?**, *Revue du Palais de la Découverte*, n° 377, novembre-décembre 2011.

D. Finkleman *et al.*, **The debate over UTC and leap seconds**, *AIAA Paper* 2010-8391, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010.

D. Savoie, **Dates, ères, styles et calendriers**, *Dossier Pour la Science* n° 42, janvier-mars 2004. http://bit.ly/doss42_savoie

D. Savoie, **Les cadrans solaires**, Belin, 2003. <http://bit.ly/cadrans>

R. Nelson *et al.*, **The leap second : its history and possible future**, *Metrologia*, vol. 38, pp. 509-529, 2001.

J. Lefort, **La saga des calendriers**, Belin/Pour la Science, 1998.

L'ours spéléologue

Véritable musée de l'ours des cavernes, la grotte Chauvet nous permet de nous représenter cette espèce disparue et d'étudier son mode de vie ainsi que son génome.

Jean-Marc Elalouf et Valérie Féruglio

Il y a 40 000 ans, les premiers hommes modernes d'Europe vivaient dans un environnement très différent du nôtre. La calotte glaciaire de l'Arctique avait une extension considérable et les glaciers des Alpes parvenaient jusque vers Lyon, qui n'existait pas... La faune associée à ce climat froid comportait de nombreuses espèces éteintes. Certaines, comme le mammouth ou l'aurochs, ont survécu après la dernière période glaciaire qui s'est terminée il y a 10 000 ans, tandis que d'autres se sont éteintes avant ou vers la fin de cette période, tels l'hyène ou l'ours des cavernes (*Ursus spelaeus*).

Tout le monde a entendu parler de l'ours des cavernes, mais que savons-nous au juste de cet animal ? Il est possible aujourd'hui de profiter des collections du spectaculaire musée naturel dédié à *Ursus spelaeus* qu'est la grotte Chauvet pour dresser un bilan de nos connaissances sur cet ours préhistorique. Découverte il y a 18 ans en Ardèche, dans le Sud de la France, cette cavité contient au moins 4 000 ossements d'ours des cavernes, issus de 200 individus, et 13 représentations du géant disparu parmi 420 images animalières réalisées par des artistes préhistoriques.

1. L'OURS DES CAVERNES a disparu à la fin de la dernière période glaciaire, assez tard pour que les premiers hommes anatomiquement modernes d'Europe le rencontrent et le dessinent. Ses ossements, qui se sont accumulés par dizaines de milliers dans les grottes d'Europe, se prêtent à des analyses génétiques.