



À LA MESURE DU TEMPS

La mesure du temps a toujours été une préoccupation des hommes depuis qu'ils ont pris conscience de son écoulement. Cette mesure a très vite permis d'organiser la société. Pour cela, les hommes ont créé des dispositifs de plus en plus ingénieux pour mesurer le temps à l'aide de phénomènes physiques bien choisis. Les liens entre la mesure du temps et l'astronomie sont d'ailleurs des plus anciens. C'est pour cette raison que la mesure du temps et la mesure de l'espace ont souvent été regroupées dans les observatoires astronomiques. Et cette intrication de l'espace et du temps est encore plus prégnante dans le cadre de la théorie de la relativité d'Einstein.

TEMPS MESURÉS, TEMPS DÉMESURÉS – VII

L'épisode précédent a présenté de façon succincte différentes méthodes de comparaison d'horloges. Ces comparaisons d'horloges sont à la base de la construction des échelles de temps sur lesquelles cet épisode reviendra plus en détail.

Les premières échelles de temps ont bien sûr été de nature astronomique. Elles utilisaient, et utilisent encore, le mouvement de rotation de la Terre (autour de son axe) ou, un peu plus tard, son mouvement de révolution (autour du Soleil). De ces échelles de temps, on peut déduire la durée de l'unité de temps : la seconde. Cette dernière est déterminée avec d'autant plus de précision que la durée d'observation (de la rotation de la Terre, de sa révolution...) est longue. Comme on le verra, les théories des mouvements de la Terre étant imparfaites, ces imperfections ont aussi une incidence sur la précision de la détermination de la seconde astronomique.

Très récemment, au xx^e siècle, l'arrivée des horloges atomiques a inversé les choses. La seconde étant parfaitement définie (grâce aux niveaux d'énergie du césium, voir l'[épisode 5](#)), on en déduit l'échelle de temps par l'intégration (la mise bout à bout, l'accumulation) des secondes réalisées par les horloges atomiques. Ces horloges étant imparfaites, l'échelle de temps diverge petit à petit par rapport à un temps parfait.

Ces deux façons d'appréhender une échelle de temps mettent en évidence la différence subtile qui existe entre la durée (la seconde) et la date (l'échelle de temps). Dans le premier cas, un étalon de temps définit la seconde, et dans le second, c'est l'intégration de durées fixes (les secondes) qui définit l'échelle de temps, c'est-à-dire la chronologie.

Si une personne dit : « Je suis ici depuis une heure », on ne sait pas si cette personne a passé ici une durée d'une heure ou si elle est arrivée ici à la date d'une heure (du matin ou de l'après-midi). Cette subtilité se retrouvera dans le cadre de la relativité générale quand on parlera de temps propre (celui d'une horloge, l'intervalle de temps entre deux événements) et de temps-coordonnée (la graduation d'une échelle de temps).

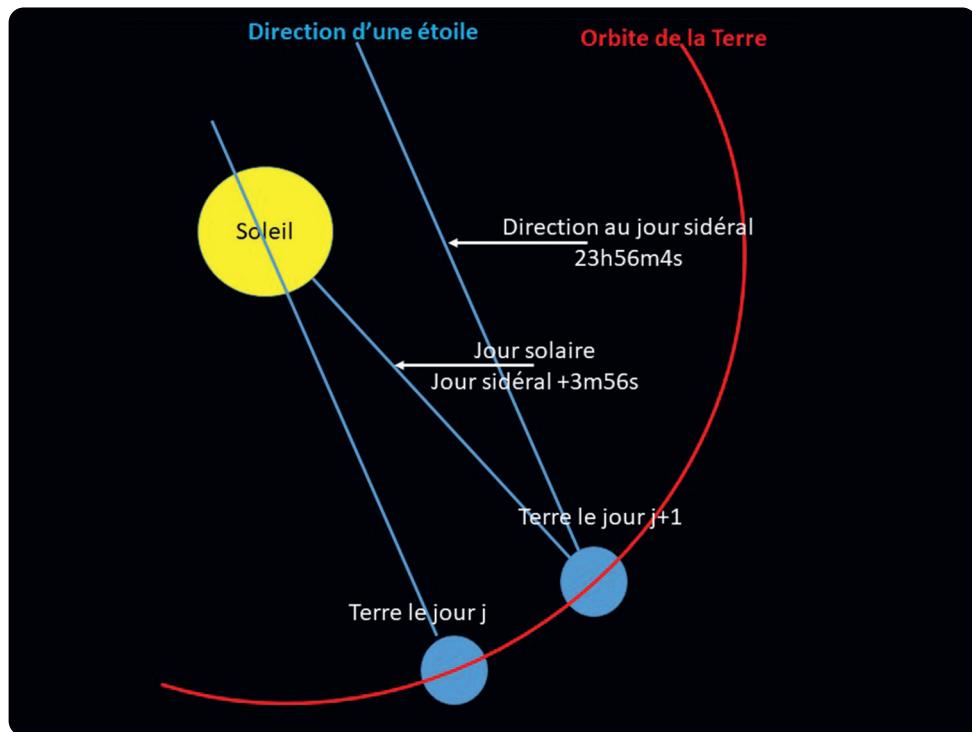
Propriétés des échelles de temps

UNE ÉCHELLE DE TEMPS doit avoir les propriétés suivantes :

- la pérennité : l'échelle de temps ne doit jamais s'arrêter ;
- l'accessibilité : l'échelle de temps doit être accessible à tous les utilisateurs potentiels ;
- la stabilité : sur un intervalle de temps donné, c'est la capacité à maintenir un rapport constant entre l'unité de l'échelle de temps et sa définition théorique. La stabilité est quantifiée par une des variances d'Allan ;
- l'exactitude : la réalisation de la durée de l'unité d'une échelle de temps doit être la plus proche possible de sa définition. L'exactitude se détermine par comparaison de la fréquence de l'échelle de temps à celle d'un étalon primaire.

Les échelles de temps astronomiques

L'**ALTERNANCE DU JOUR ET DE LA NUIT**, qui traduit la rotation de la Terre, est bien sûr le premier phénomène qui est apparu aux hommes et qui a permis de réaliser des échelles de temps. La première d'entre elles, jusqu'en 1960, est le temps universel (TU ou UT pour *Universal Time*), dans laquelle la seconde est définie comme étant égale à 1/86 400 partie du jour solaire moyen. Le temps universel est défini comme étant le temps civil de Greenwich, c'est-à-dire le temps solaire moyen de Greenwich (GMT pour *Greenwich Mean Time*) augmenté de 12 h. Le temps solaire moyen de Greenwich est le temps solaire vrai (ou « angle horaire ») donné par un cadran solaire situé au méridien de Greenwich corrigé de l'équation du temps (voir l'[épisode 5](#)). Historiquement, le temps universel était déterminé en notant l'instant de passage au méridien



Temps sidéral et temps moyen.

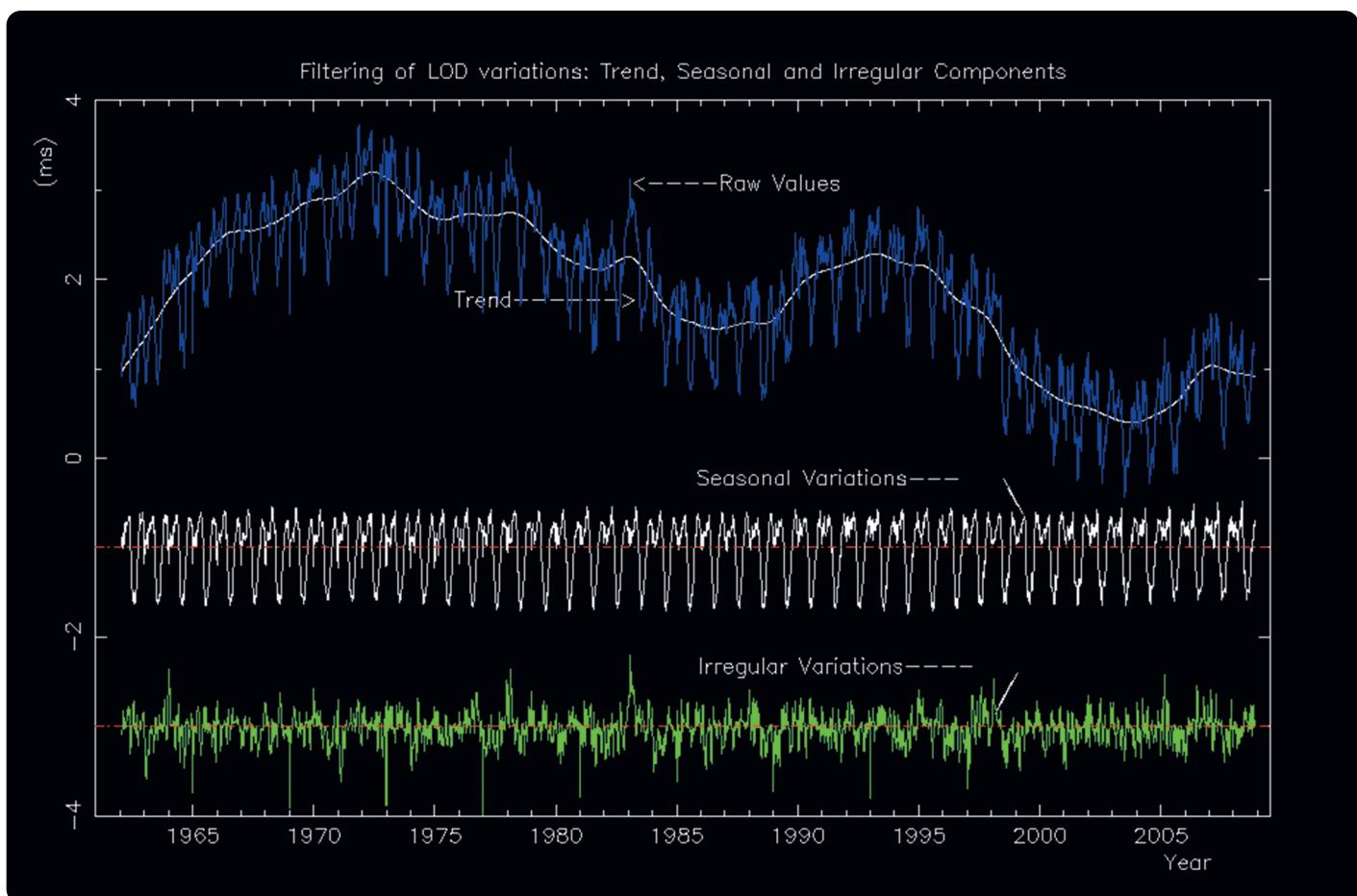
Lorsque la Terre fait un tour autour de son axe par rapport à une étoile lointaine, le Soleil n'est pas encore revenu dans la même direction. Ceci est dû au fait que la Terre tourne aussi autour du Soleil. La Terre doit donc tourner un peu plus autour de son axe pour que le Soleil revienne au même endroit dans le ciel (au sud par exemple)

Crédits F. Taris

d'étoiles de coordonnées connues. Cette mesure donne en fait le temps sidéral (le temps par rapport aux étoiles), qu'il est facile de convertir en temps moyen (un jour sidéral moyen dure 23 h 56 min 04 s de temps solaire moyen).

Actuellement, le temps universel est déterminé par la technique de radio-interférométrie à très longue ligne de base dite VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*, <https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=VLBI&lang=fr>) avec une contribution

des méthodes satellitaires pour les variations rapides (jusqu'à deux mois). Cette technique a mis en évidence des instabilités à court terme de la rotation de la Terre et une durée du jour qui augmente de 0,002 s/siècle environ. L'échelle de temps correspondante s'appelle UT1 (temps universel rapporté à l'axe de rotation instantané, ou pôle mobile, de la Terre), son écart par rapport aux échelles de temps atomique étant l'un des paramètres de rotation de la Terre (<https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=orientation&lang=fr>).



Variation de la durée du jour sur un demi-siècle (OP-IERS).

La tendance (ligne blanche au milieu de la courbe bleue) est due à l'influence dynamique du noyau liquide de la Terre et aux variations climatiques dans l'atmosphère. La courbe blanche du milieu montre des variations saisonnières et la courbe verte des variations résiduelles. Voir aussi cette variation depuis 2000 av. J.-C. :

https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=lod_eclipses&lang=en

Crédits IERS

Les irrégularités de la rotation de la Terre, connues dès les années 1930 et même évoquées par Kant dès 1754, devenant trop importantes au niveau de pré-

cision souhaité (éphémérides des corps du Système solaire par exemple), les astronomes ont ensuite introduit une échelle de temps basée sur la révolu-

tion de la Terre. Cette échelle de temps s'appelle le temps des éphémérides (TE ou ET pour *Ephemeris Time*). Elle a été en usage dans la première moitié des années 1960, mais reste encore indispensable à l'interprétation d'observations anciennes (avant l'introduction du TAI dont on parlera plus loin). Cette échelle de temps est basée sur le mouvement orbital de la Terre, ce dernier étant accessible par l'observation de la longitude du Soleil.

En utilisant les observations du Soleil de 1680 à 1895, Simon Newcomb (https://fr.wikipedia.org/wiki/Simon_Newcomb) a déterminé que la longitude du Soleil s'exprime par :

$$L_s = 279^\circ 41'48'',04 + 129\,602\,768'',13T_{\text{eph}} + 1'',089T_{\text{eph}}^2$$

En mesurant L_s , on en déduit donc le temps des éphémérides T_{eph} . En 1952, l'Union astronomique internationale a adopté cette expression qui rend la longitude du Soleil exacte par définition. La onzième Conférence générale des poids et mesures (CGPM) décida en 1960 que (<https://www.bipm.org/fr/committees/cg/cgpm/11-1960/resolution-9>) « la seconde est la fraction 1/315 569 25,9747 de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides » (le 0 janvier 1900 correspond au 31 décembre 1899...). L'année tropique est la période de révolution de la Terre qui tient compte du mouvement des équinoxes. Il en existe plusieurs définitions (https://ftp.imcce.fr/pub/misc/annee_tropique/annee_tropique.doc).

La définition de la seconde de temps des éphémérides est difficile à réaliser en pratique, car il s'agit de mesurer la position du Soleil par rapport aux étoiles. Cette mesure ne peut évidemment pas être effectuée directement. On fait donc appel à l'observation du mouvement de la Lune... qui est treize fois plus rapide que le mouvement du Soleil. Ce mouvement doit donc être compensé pendant la pose photographique (rotation d'une lame à faces parallèles) afin d'en déduire (enfin !) la longitude du Soleil. Il semble de plus que cette défini-

tion soit fort difficile à comprendre en dehors du cercle des astronomes et, à l'intérieur de ce cercle, en dehors du cercle des astronomes spécialisés ! Il faut par ailleurs attendre au moins un an pour que l'imprécision des mesures ne soit pas excessive (de l'ordre de 0,1 s) : le temps des éphémérides est déterminé, à court terme, avec une précision nettement moins bonne que le temps universel. Par contre, il offre l'avantage d'une très bonne stabilité à long terme : de l'ordre de quelque 10^{-9} (soit 1 seconde en 10 ans).

La définition de la seconde des éphémérides sera donc abandonnée en 1967 au profit d'une définition basée sur les niveaux d'énergie de l'atome de Cs133, comme on l'a vu dans l'[épisode 8](#) (l'exactitude des horloges atomiques atteignait déjà 10^{-12} , soit 1 seconde en 30 000 ans).

Comme mentionné dans l'introduction de cet épisode, c'est un étalon de temps qui définit la seconde en astronomie. Le « jour solaire moyen » dans le cas du temps universel et « l'année tropique » dans le cas du temps des éphémérides. La durée de la seconde du Système international s'en déduit.

Les échelles de temps atomique

PUIS C'EST LE TEMPS DES ATOMES qui à partir de 1967 prend la relève de l'astronomie, la troisième définition de la seconde étant encore aujourd'hui :

DÉFINITION OFFICIELLE

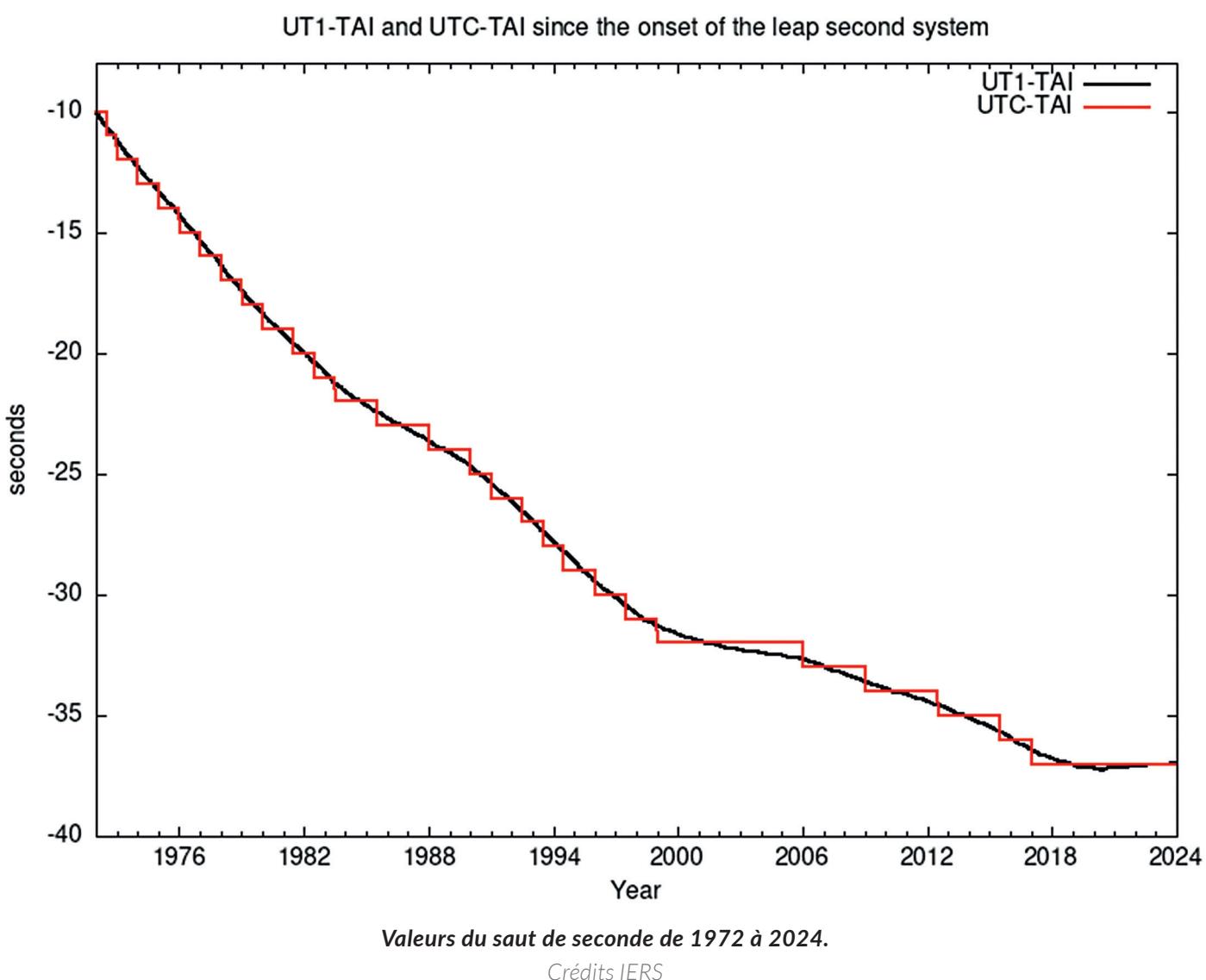
« La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césum 133 non perturbé. »

C'est maintenant un étalon de fréquence qui définit la seconde en physique.

L'échelle de temps qui en découle est le temps atomique international (TAI), « coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau International de l'Heure sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements conformément à la définition de la seconde, unité de temps du Système International d'Unités ». Cette définition du TAI a été recommandée en 1970 par le 5^e CCDS, Comité consultatif pour la définition de la seconde (<https://www.bipm.org/fr/committees/cc/cctf/5-1970/resolution-2>) et reconnue par la 14^e Conférence générale des poids et mesure (CGPM) en 1971. Elle sera complétée en 1980 lors de la 9^e session du CCDS :

« Le TAI est une échelle de temps-coordonnée définie dans un repère géocentrique avec comme unité d'échelle la seconde SI, telle qu'elle est réalisée sur le géoïde en rotation. »

Le contexte de la relativité générale apparaît dans cette définition, nous allons y revenir plus loin. La responsabilité de l'établissement du TAI sera transférée, en 1988, du Bureau international de l'heure (BIH) au Bureau international des poids et mesure (BIPM). Le TAI est donc bien une échelle de temps intégrée (accumulation des secondes), contrairement aux échelles de temps précédentes qui sont basées sur un découpage arbitraire qui conduit à la définition de la seconde.



Le calcul du TAI s'effectue en deux étapes. Le BIPM calcule tout d'abord une échelle atomique dite « libre » (EAL) issue des données de comparaison d'horloges (moyenne pondérée d'environ 450 horloges réparties dans 80 laboratoires dans le monde). Puis il corrige les fréquences de l'EAL par comparaison des lectures d'une dizaine d'étalons primaires de fréquence, en appliquant des corrections relativistes du géoïde défini par convention. Les écarts des horloges participantes au TAI sont publiés de cinq jours en cinq jours, chaque mois, dans la circulaire T (ou, ce qui revient au même par rapport à UTC, voir ci-dessous et <https://www.bipm.org/fr/time-ftp/circular-t>).

La meilleure estimation de l'écart entre TAI et TE est de 32,184 s le 1^{er} janvier 1977, l'origine de TAI ayant par ailleurs été choisie arbitrairement en coïncidence avec UT1 le 1^{er} janvier 1958 à 0 h UT1.

Le temps universel coordonné, UTC, a été défini en 1972 et n'est pas autre chose que le TAI, décalé d'un nombre entier n de secondes (le fameux « saut de seconde » ou « seconde intercalaire » ou « *leap second* »), de façon à ce que l'écart entre UTC et UT1 soit toujours inférieur à 0,9 s. Ce qui s'écrit sous forme condensée :

$$\begin{aligned} \text{UTC} - \text{TAI} &= n \\ |\text{UTC} - \text{UT1}| &< 0,9 \text{ s} \end{aligned}$$

Les sauts de secondes sont annoncés dans le bulletin C de l'IERS (<https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=bulletins&lang=fr>). UTC est un temps hybride qui a les mêmes qualités métrologiques que le TAI tout en suivant au mieux la rotation de la Terre (ses irrégularités...). Le « cas » des secondes intercalaires est actuellement étudié, ces dernières pouvant disparaître à terme.

Les échelles de temps dans le cadre de la relativité générale

DANS LE CADRE de la relativité générale, notre espace est un espace à quatre dimensions dans lequel chaque événement de l'espace-temps a trois coordonnées spatiales (x, y, z) et une coordonnée temporelle (t). De plus, la relativité générale s'applique dans un univers où masse et énergie courbent l'espace-temps. Autrement dit, à tout système de masses dans l'Univers peut être associé un système de coordonnées spatio-temporelles centré au barycentre des masses considérées et ne présentant pas de rotation globale par rapport aux galaxies lointaines.

Pour la partie de l'astronomie qui nous occupe, il est commode de considérer deux systèmes de référence, l'un centré au barycentre du Système solaire (qu'on appelle BCRS pour *Barycentric Celestial Reference System*) et l'autre au centre de masse de la Terre (qu'on appelle GCRS pour *Geocentric Celestial Reference System*). Les axes des coordonnées spatiales de ces systèmes sont dans des directions fixes par rapport à des sources extragalactiques compactes (quasars), et l'unité de mesure utilisée sur ces axes est le mètre du Système international. L'un des axes pointe approximativement vers le pôle de rotation de la Terre au 1^{er} janvier 2000 et un deuxième vers l'équinoxe de cette date. Le GCRS est utilisé pour les études au voisinage immédiat de la Terre (dynamique de la Terre, mouvement des satellites...), alors que le BCRS doit être utilisé au-delà de ce voisinage (éphémérides du Système solaire, définition de l'écliptique, navigation interplanétaire...).

La coordonnée t , voisine du temps des horloges (le temps propre), s'appelle le temps-coordonnée. Elle peut être barycentrique ou géocentrique. Insistons bien sur le fait que temps propre, celui au voisinage d'une horloge (intervalle de temps entre deux événements).

ments) et temps-coordonnée (la graduation d'une échelle de temps) sont deux concepts différents bien que proches. Il existe d'ailleurs des relations mathématiques entre temps propre et temps-coordonnées.

Le temps-coordonnée géocentrique (TCG) est le temps-coordonnée d'un système de coordonnées ayant pour origine le centre de la Terre (GCRS).

À cette échelle, on peut associer une autre échelle de temps-coordonnée qui s'appelle le temps terrestre TT. Elle est recalculée à partir du TCG, de façon à avoir approximativement le même rythme que le temps propre d'une horloge au repos sur le géoïde. La relation entre TT et TCG est :

$$\text{TCG} - \text{TT} = L_G \times (\text{JD} - 244\,3144,5) \times 86\,400$$

avec $L_G = 6,969\,290\,134 \times 10^{-10}$

JD étant la date julienne.

Ou, ce qui revient au même :

$$\text{TCG} - \text{TT} = L_G \times 86\,400 \times \Delta j$$

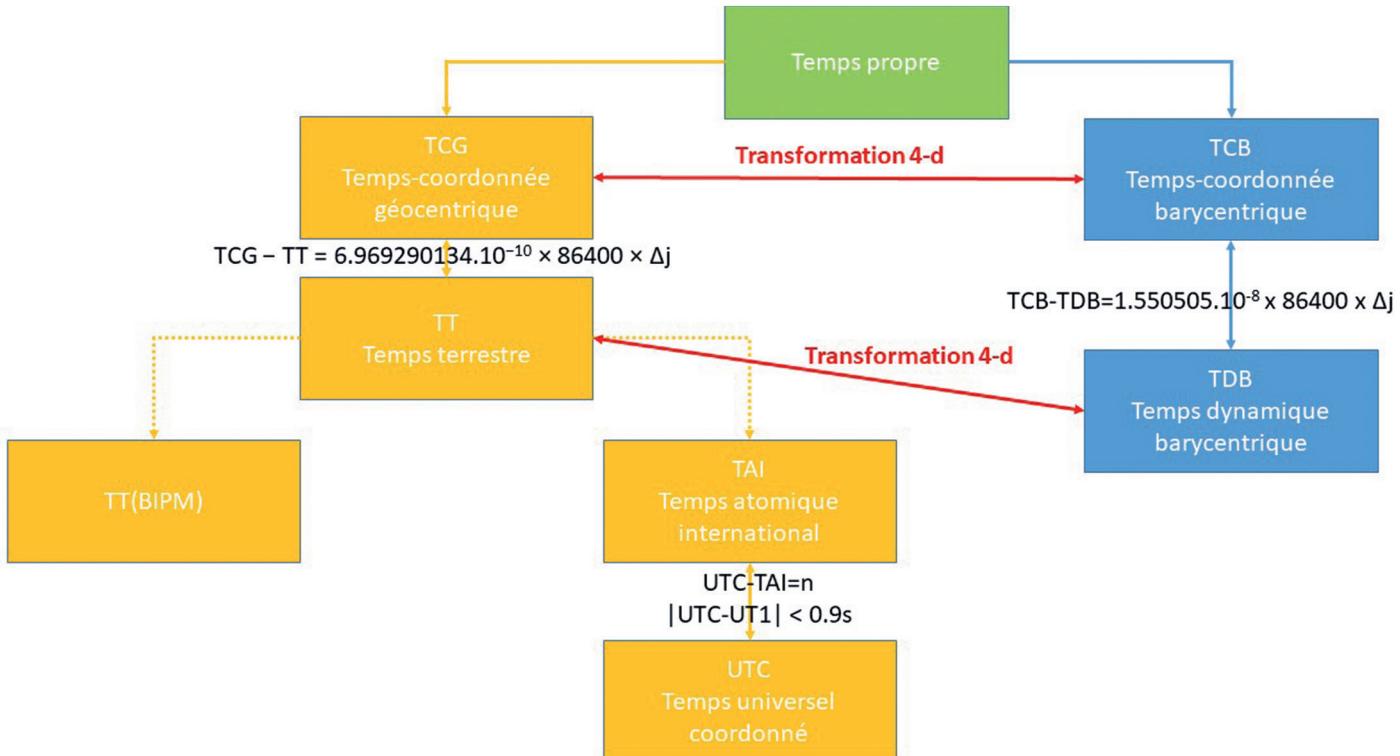
Δj étant le nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} janvier 1977 à 0 h de TAI.

Le TT est une échelle idéale dont le TAI est une réalisation. On la note TT(TAI). Mais il en existe (au moins) une autre, TT(BIPM), qui diffère essentiellement de la première par la méthode utilisée pour corriger la fréquence de l'EAL (<https://www.bipm.org/fr/time-ftp/tt-bipm->).

Le temps terrestre assure également la continuité du temps des éphémérides depuis le 1^{er} janvier 1977 :

$$\text{TT} = \text{TE} = \text{TT}(TAI) = TAI + 32,184 \text{ s}$$

Dès que l'on s'éloigne du voisinage de la Terre, il y a lieu d'utiliser le temps-coordonnée barycentrique, TCB, qui est le temps-coordonnée d'un système de



Relation entre temps propre et temps-coordonnées.

Les transformations quadridimensionnelles peuvent être trouvées dans la bibliographie.

Les flèches en pointillés indiquent des réalisations pratiques du TT.

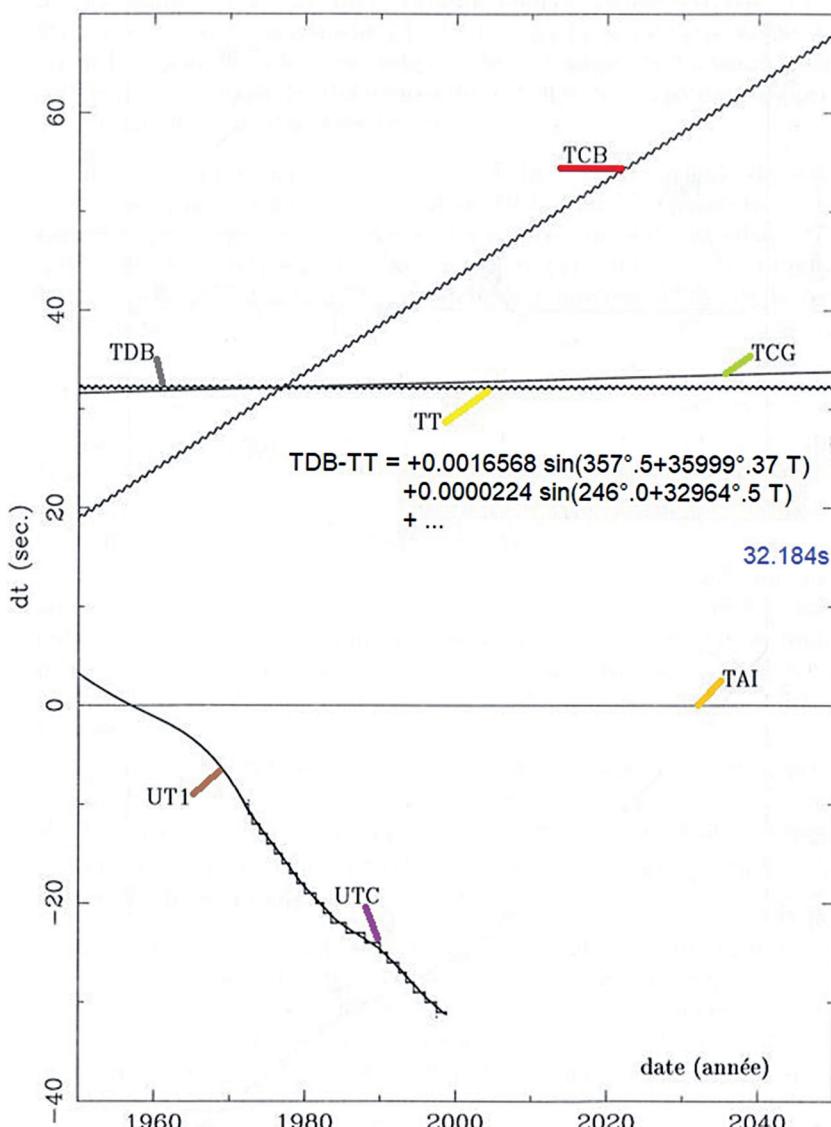
Crédits F. Taris

coordonnées ayant pour origine le barycentre du Système solaire (BCRS). La relation quadridimensionnelle de passage du TCB au TCG est relativement complexe, et nous renvoyons le lecteur intéressé à la bibliographie (voir aussi les résolutions de l'UAI adoptées lors de sa 24^e assemblée générale à Manchester en août 2000 : https://syrte.obspm.fr/IAU_resolutions/Resol-UAI.htm).

Mentionnons simplement que la transformation rigoureuse qui fait passer des coordonnées spatio-temporelles exprimées dans le BCRS à celles exprimées dans le GCRS corrige la position géocentrique d'un

objet céleste des effets de la révolution de la Terre, de l'effet de courbure gravitationnelle des rayons lumineux par le Soleil et les corps du Système solaire et des marées terrestres.

Enfin, pour des besoins très particuliers liés au calcul des éphémérides (par exemple celles du Jet Propulsion Laboratory), le temps dynamique barycentrique TDB est toujours utilisé (<https://drive.google.com/file/d/1J1ykVX0u8AN9qn0KCelzIT-SKV0Eo-p1/view>). Il a été (re)défini en 2006 lors de la 26^e assemblée générale de l'Union astronomique internationale.



Les différentes échelles de temps représentées sur un siècle.

Les termes périodiques de TDB et TCB sont amplifiés 100 fois afin d'être visibles.
De plus, la différence entre TDB et TT ne contient que des termes périodiques (IAU 2006, résolution 3).

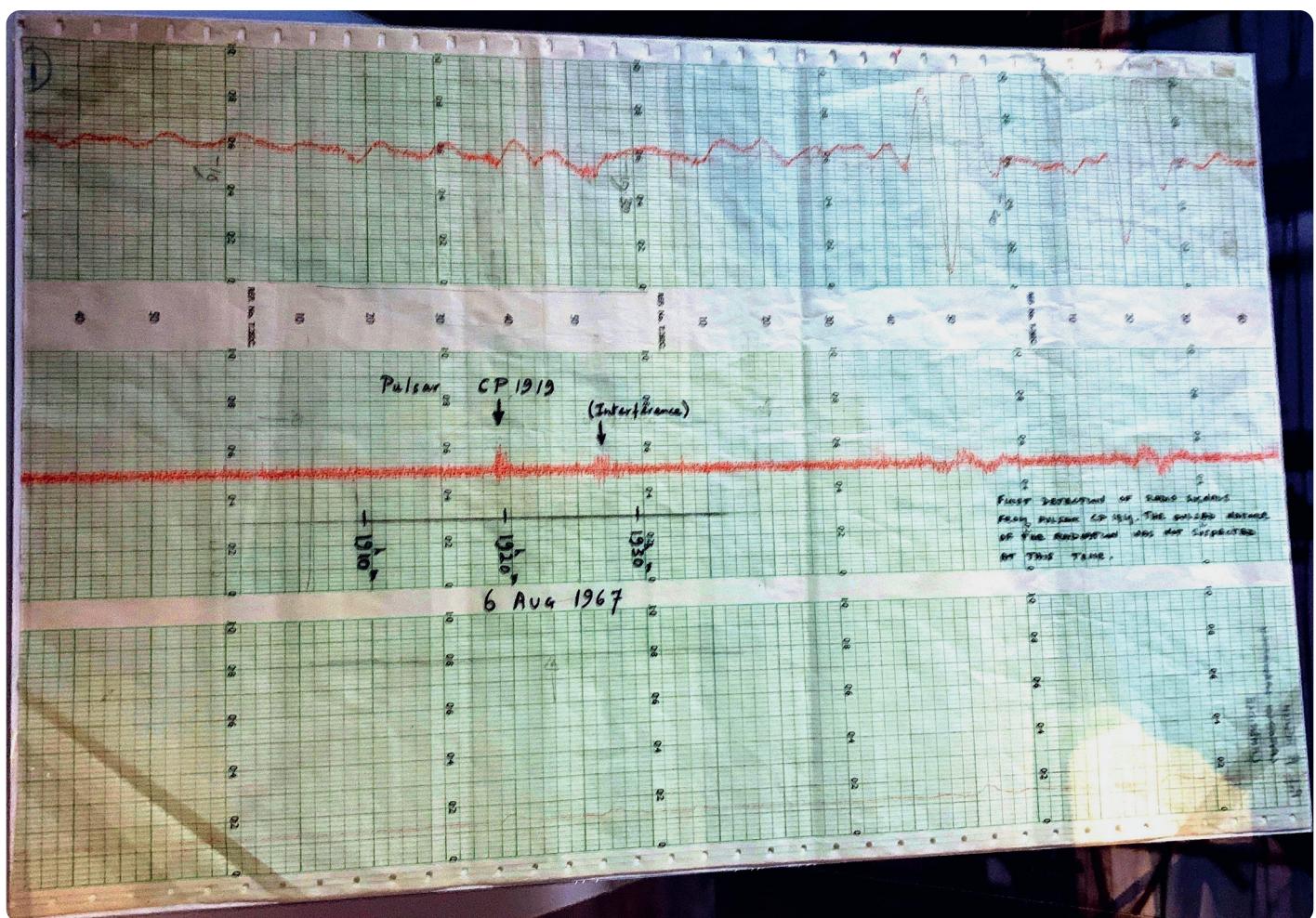
Crédits LTE

Une autre échelle de temps astronomique, le temps des pulsars

AVANT DE CLORE cet avant-dernier épisode de l'histoire de la mesure du temps, attardons-nous sur une échelle de temps astronomique qui a été imaginée dès 1986 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/22/1/005>) à la suite de la découverte des pulsars par Jocelyn Bell en 1967 (ce qui valut le prix Nobel de physique à son directeur de thèse Antony Hewish, <https://www.nature.com/articles/217709a0>) et surtout des pulsars

millisecondes en 1982 (<https://www.nature.com/articles/300615a0>).

En 1967, une équipe de l'université de Cambridge dirigée par A. Hewish étudiait la scintillation des radiosources provoquée par l'inhomogénéité du plasma de la couronne solaire. J. Bell, l'étudiante de A. Hewish, remarqua une source brillante même de nuit dont les signaux étaient étonnamment réguliers avec une période d'une seconde. D'autres sources (pulsars du Crabe et de Vela) furent détectées peu après, qu'on appela alors *pulsar* pour *PULSating Astronomical Radiosource*. La figure suivante montre le signal du premier pulsar observé par Jocelyn Bell.



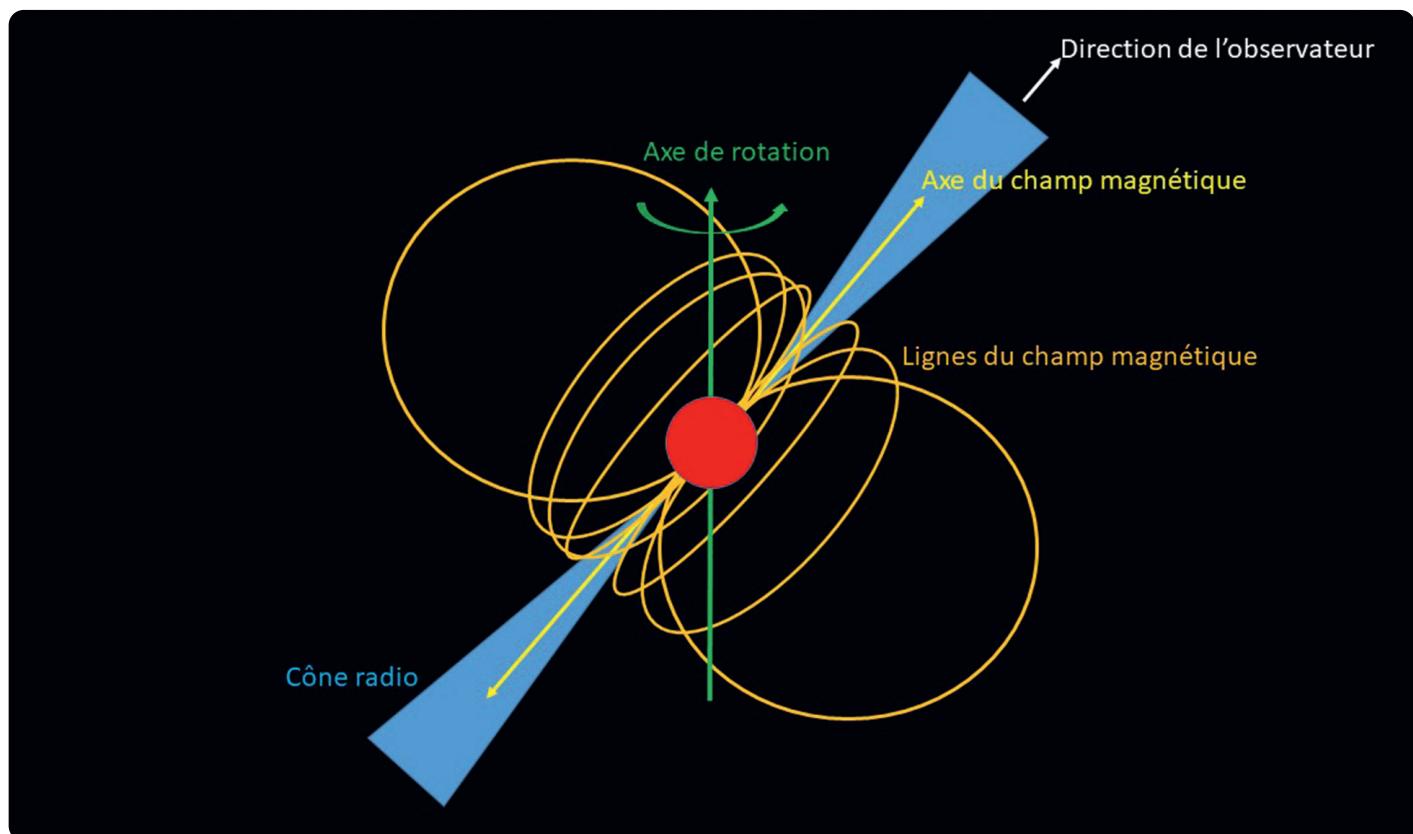
Le premier pulsar (PSR B1919+21) observé en août 1967 par Jocelyn Bell.

CC BY-SA 4.0 Billthom

Dès 1934, Baade (https://fr.wikipedia.org/wiki/Walter_Baade) et Zwicky (https://fr.wikipedia.org/wiki/Fritz_Zwicky) avaient proposé l'existence d'étoiles à neutron, qui représentent un stade de l'évolution d'une étoile massive (effondrement du cœur).

Le diamètre d'une étoile à neutron est typiquement de l'ordre de 10 km. Elle est essentiellement constituée de neutron, et sa masse est de l'ordre de 1,5 masse solaire. La densité en surface est de l'ordre de 10^6 g/cm^3 et de 10^{15} g/cm^3 en son centre.

Les pulsars sont des étoiles à neutron fortement magnétisées, leur champ magnétique allant de 10^8 T pour les jeunes pulsars à 10^6 T pour les vieux pulsars, en passant par 10^4 T pour les pulsars millisecondes. La rotation de l'étoile s'effectue autour d'un axe qui n'est en général pas aligné avec l'axe du champ magnétique. Cette dernière propriété est importante, elle permettra de construire une échelle de temps et nous allons y revenir. Pour qu'une étoile à neutrons soit un pulsar, il faut que l'observateur soit à l'intérieur du cône d'émission radio dont l'axe est le champ magnétique de l'étoile.



Le phénomène est identique à celui d'un phare près des côtes qui indique, à intervalles de temps réguliers, la présence de la terre (l'axe de rotation et l'axe du cône de lumière font alors exactement 90°).

Crédits F. Taris

Il existe deux catégories de pulsars, les pulsars « normaux » et les pulsars millisecondes. Ces deux groupes se distinguent par leur vitesse de rotation. Dans le cas des pulsars normaux, la période de rotation est de l'ordre de quelques dizaines de

millisecondes (jusqu'à quelques secondes pour les vieux pulsars). Elle est la conséquence de l'effondrement du cœur de l'étoile et de la conservation de son moment cinétique.

Mais, en 1982, un pulsar d'un autre type a été découvert avec une période de rotation de 1,6 ms. Une caractéristique importante de ces objets est que, au contraire des pulsars jeunes, leur période dérive très peu dans le temps (de l'ordre de 10^{-19} s/s), cette dérive pouvant même être positive. On explique cela par le fait que les pulsars millisecondes sont des pulsars réaccélérés, cette nouvelle accélération provenant d'un transfert de matière d'un compagnon (le pulsar absorbe son compagnon).

On connaît aujourd'hui environ 2 500 pulsars observés principalement en radio et 250 observés en X et gamma.

C'est donc en 1986 qu'une nouvelle échelle de temps astronomique a été imaginée, l'échelle de temps des pulsars, qui pourrait être comparée aux meilleures échelles de temps atomiques.

Les impulsions radio sont datées soit à l'aide d'une horloge atomique qui est régulièrement comparée aux échelles de temps atomiques grâce à l'utilisation du GPS (voir épisode précédent) soit directement par le temps du GPS dont on connaît les écarts au TAI.

Les étapes permettant d'obtenir le résultat final de la comparaison ne peuvent être abordées ici en détail faute de place, le lecteur intéressé est donc renvoyé à la bibliographie à la fin de cet épisode (voir aussi <https://theses.fr/resultats?q=Pulsars+milliseconde&page=1&nb=10&tri=pertinence&domaine=theses>).

Mentionnons schématiquement que l'on doit calculer la date théorique d'arrivée d'une impulsion sur Terre et que l'on compare cette dernière à son observation. La différence entre temps d'arrivée observé et temps d'arrivée calculé (qu'on appelle « résidus ») permet d'ajuster un certain nombre de paramètres par moindres carrés. Ces résidus sont calculés grâce à une relation où interviennent des valeurs approchées de la période des impul-

sions (éventuellement de sa dérivée), de l'effet Doppler, du mouvement de la Terre autour du Soleil et de celui du pulsar dans la Galaxie ainsi qu'un terme correspondant au retard dû à la courbure de l'espace-temps. Il faut aussi tenir compte de la dispersion du milieu interstellaire, car plus la fréquence d'observation est basse, plus le signal est retardé. Les résidus après ajustement des paramètres approchés permettent alors la comparaison de l'échelle de temps du pulsar observé au TAI.

Les résidus de chronométrage sont caractérisés par des variations pic à pic de quelques microsecondes pendant plusieurs années. Cette caractéristique a pu faire penser que les pulsars pourraient participer à l'amélioration de la stabilité à long terme des échelles de temps atomique.

Mais aujourd'hui, avec les améliorations obtenues dans le domaine de la physique, la métrologie du temps ne semble plus être l'un des buts premiers du chronométrage des pulsars millisecondes. Ce chronométrage reste par contre très utile pour la détection des ondes gravitationnelles réalisée, par exemple, dans le cadre de l'EPTA (*European Pulsar Timing Array*, <https://www.epta.eu.org/>). L'EPTA est une collaboration européenne dans laquelle l'Observatoire de Paris est très présent grâce à son Observatoire radioastronomique de Nançay (ORN). Les ondes gravitationnelles modifient effectivement la géométrie de l'espace-temps sur leur passage, modifiant ainsi le temps de trajet du signal périodique du pulsar.

Dans le prochain et dernier épisode, nous verrons d'autres applications de la métrologie temps/fréquence à l'astrophysique. ■

Bibliographie

- C. Audoin & B. Guinot, *Les Fondements de la mesure du temps*, Masson, 1998.
- D. C. Backer *et al.*, « A millisecond pulsar »,
Nature, vol. 300, décembre 1982, p. 615-618, <https://doi.org/10.1038/300615a0>
- J. Berthier, « Définitions relatives aux éphémérides de position des corps célestes »,
Notes scientifiques et techniques du Bureau des longitudes, S060,
https://ssp.imcce.fr/webservices/miriade/doc/doc_ephemcc.pdf
- F. Biraud, « Les pulsars millisecondes », *Revue du CLEA*, n°60, hiver 1992, p. 2.
- C. Boucher (avec le concours de P. Willis), *Les Références de temps et d'espace*, Hermann Ed., 2017.
- I. Cognard, « Chronométrage des pulsars millisecondes PSR1937+21 et PSR1821–24 au radiotélescope de Nançay », thèse de l'Université Paris VI, 1993.
- L. Essen, « Time Scales », *Metrologia*, vol. 4, n° 4, 1968, p. 161-165,
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/4/4/003>
- McCarthy, « Evolution of timescales from astronomy to physical metrology »,
Metrologia, vol. 48, n° 4, 2011, S132, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/48/4/S03>
- L. Fairhead, « Chronométrage du pulsar millisecond PSR1937+214. Analyse astrométrique et observations à Nançay », thèse de l'Observatoire de Paris, 1989.
- A. Hewish, S. J. Bell, « Observation of a rapidly pulsating radio source »,
Nature, vol. 217, février 1968, p. 709-713.
- G. Hobbs, « A pulsar-based time-scale from the International Pulsar Timing Array »,
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 491, iss. 4, février 2020, p. 5951-5965,
<https://doi.org/10.1093/mnras/stz3071>
- ITU, Transfert de temps relativiste, Recommandation UTI-R TF.2118-0 (12/2018),
Série TF, Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires,
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/tf/R-REC-TF.2118-0-201812-I!!PDF-F.pdf
- V. G. Ill'in, « Pulsar time scale – PT », *Metrologia*, vol. 22, n° 1, 1986, p. 65-67,
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/22/1/005>
- J. Kovalevsky, « Le Temps des éphémérides », *L'Astronomie*, vol. 78, 1964, p. 321.
- A. G. Lyne & F. Graham-Smith, *Pulsar astronomy*, Cambridge university press, 1990.
- G. Panfilo, F. Arias, « The Coordinated Universal Time (UTC) »,
Metrologia, vol. 56, n° 4, 2019, p. 1-26, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/ab1e68>

R. Park, « The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441 », *The Astronomical Journal*, vol 161, n° 3, 2021, p. 105, <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/abd414>

G. Petit, « Relativité et mesure du temps »,
<https://academiesciencesmoralesetpolitiques.fr/wp-content/uploads/2019/01/petit.pdf>

G. Petit & P. Wolf, « Relativistic theory for time comparisons: a review », *Metrologia*, vol. 42, n° 3, 2005, S138–S144, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/42/3/S14>

G. Petit, « Observations VLBI des pulsars millisecondes pour le raccordement des systèmes de référence célestes et la stabilité des échelles de temps », thèse de l’Observatoire de Paris, 1994.

D. Reardon, « Timing analysis for 20 millisecond pulsars in the Parkes Pulsar Timing Array », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 455, iss. 2, janvier 2016, p. 1751–1769, <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2395>

F. Suagher, « Le Temps au xx^e siècle », *Cahiers Clairaut*, n° 83, automne 1998,
http://www.clea-astro.eu/archives/cahiers-clairaut/CLEA_CahiersClairaut_083_01.pdf

F. Taris, « Pulsars millisecondes et métrologie du temps », thèse de l’Observatoire de Paris, 1996.

P. Tavella & G. Petit, « Precise time scales and navigation systems: mutual benefits of timekeeping and positioning », *Satellite Navigation*, vol. 1, n° 10, 2020.

S. Turyshev, « Time transformation between the solar system barycenter and the surfaces of the Earth and Moon », arXiv:2406.16147v2, <https://arxiv.org/html/2406.16147v2>

P. Uhrich, « Caractérisation de la stabilité en temps-fréquence. Application aux comparaisons d’horloges », <https://indico.in2p3.fr/event/31598/attachments/81883/120823/2006AllanVar.pdf>

Liens Internet

<https://first-tf.fr/grand-public-scolaires/comment-ca-marche/les-echelles-de-temps/>

<https://www.ucolick.org/~sla/leapsecs/timescales.html>

<https://perso.imcce.fr/jean-eudes-arlott/ecoole-ete-aout-2017/cours/cours-le%20temps%20en%20physique%20et%20en%20astronomie.pdf>

Pulsars : la grande horlogerie cosmique, <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-methode-scientifique/pulsars-la-grande-horlogerie-cosmique-7331920>