LES ÉCHELLES DE TEMPS MODERNES

François Vernotte
Observatoire de Besançon

1 Temps-Durée et Temps-Date : le sablier et le calendrier

La langue française, contrairement à d'autres langues telles que l'allemand et l'anglais, présente une ambiguïté : elle ne distingue pas le temps-durée du temps-date. Par exemple 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 (eine Stunde, one hour), ou si elle est arrivée ici à la date une heure (eine Uhr, one O'clock).

Une durée est la différence de deux dates : elle correspond à une différentielle de la date. De même, en intégrant des durées constantes, on peut repérer la date. Historiquement, le temps a été mesuré avec des instruments indiquant la date, tels que le calendrier et le cadran solaire, et des instruments accumulant des durées fixes, tels que le sablier ou la clepsydre.

Cette différence correspond aux notions plus récentes d'***unité de temps*** et d'***échelle de temps*** :

– l'étalon de temps définit l'unité de temps-durée : la seconde ;
– l'horloge compte les unités de temps et définit le temps-date : l'échelle de temps.

Une échelle de temps moderne doit vérifier quatre qualités :

Pérennité : Une échelle de temps doit pouvoir continuer à dater tous les événements futurs.

Accessibilité - Universalité : Une échelle de temps doit être accessible à tous les utilisateurs potentiels.

Stabilité : La durée de l'unité d'une échelle de temps doit être constante dans le temps.

Exactitude : La durée de l'unité d'une échelle de temps doit être égale à la définition de l'unité.

Par exemple, une horloge qui réalise des unités de temps toujours rigoureusement égales à 0,9 seconde est parfaitement stable mais très inexacte. À l'inverse, une horloge dont la réalisation de l'unité de temps varie de 0,9 s à 1,1 s mais dont la moyenne vaut précisément 1 s, est très instable mais exacte. On distingue aussi souvent la stabilité à court terme (propriété d'une horloge dont la réalisation de l'unité de temps varie très peu sur des temps courts, mais évolue lentement au cours du temps) et la stabilité à long terme (propriété d'une horloge dont la réalisation de l'unité de temps varie beaucoup sur des temps courts, mais dont la moyenne évolue peu au cours du temps).

2 Les Anciennes Échelles de Temps

2.1 Première définition de la seconde (définition officielle de la seconde du Système International d'unité jusqu'en 1960) :

> La seconde est la 1/86400$^{\text{ème}}$ partie du jour solaire moyen.

L'échelle de temps qui lui correspond est le ***Temps Universel*** (UT) :

> Le Temps Universel UT est le temps solaire moyen pour le méridien origine augmenté de 12 heures.

En toute rigueur, le temps solaire n'est pas un temps, c'est un angle : le temps solaire vrai en un lieu et à un instant donnés est l'angle horaire du Soleil en ce lieu et à cet instant. Mais c'est un angle qui augmente (presque) proportionnellement au temps.

En fait, la définition de UT ne fait pas intervenir le temps solaire vrai mais le temps solaire moyen. Le temps solaire vrai fluctue au cours du temps à cause principalement de deux phénomènes :

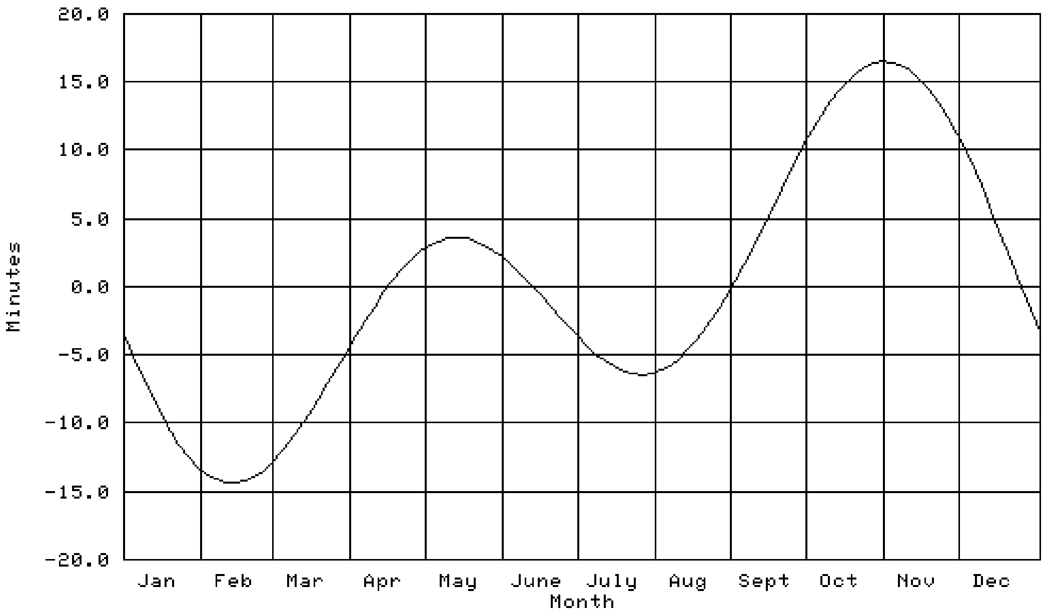


FIG. 1: l'équation du temps

1. L'orbite de la Terre est une ellipse. Le mouvement de la Terre autour du Soleil, donc le mouvement apparent du Soleil dans le ciel, varie suivant la proximité du Soleil, plus vite au mois de janvier lorsque la Terre est au périhélie, moins vite en juillet lorsque la Terre est à l'aphélie. Par conséquent, la durée du jour solaire vrai est plus courte en janvier et plus longue en juillet (attention, cet effet n'a rien à voir avec le fait que les journées sont plus longues en été qu'en hiver !). Cette variation du jour solaire vrai a donc une période d'un an.
2. C'est la projection du mouvement du Soleil sur l'équateur céleste qui détermine la durée du jour solaire. Aux solstices, le Soleil se déplace parallèlement à l'équateur céleste alors qu'aux équinoxes son déplacement est incliné de 23°27' par rapport à l'équateur céleste. La projection géométrique du Soleil sur l'équateur se déplace donc plus rapidement aux solstices qu'aux équinoxes. La variation correspondante du jour solaire vrai a donc une période de six mois.

Le temps solaire moyen correspond au temps solaire vrai débarrassé de ces fluctuations. Ces dernières, qui cumulées sur une année atteignent une amplitude d'une vingtaine de minutes, peuvent en effet être aisément calculées et donc corrigées : c'est l'équation du temps (voir figure 1), bien connue des amateurs de cadrans solaires.

2.1.1 Détermination du Temps Universel :

Pratiquement, on détermine le temps universel en notant l'instant de passage au méridien (plan Nord-Sud) d'étoiles de coordonnées connues. Une telle mesure donne en fait le temps sidéral, qu'il faudra ensuite convertir en une première échelle de temps universel, appelée UT0, qui constitue en quelque sorte un “temps universel brut”. La dernière étape consiste à calculer la position de l'axe de rotation instantané de la Terre (le pôle Nord, par exemple, se déplace à la surface du globe de plusieurs mètres par an) et à calculer le temps universel rapporté à cet axe de rotation instantané : c'est UT1, qui, plus précis qu'UT0, constitua l'échelle de temps officielle jusqu'en 1960. Elle nécessitait le concours d'un grand nombre d'observatoires, tant pour la détermination du temps sidéral que pour le calcul de la position de l'axe de rotation instantané de la Terre.

2.1.2 Incertitude sur la détermination du Temps Universel :

En temps réel, on peut accéder à UT0 avec une exactitude de l'ordre de 0,1 seconde.

Après correction (2 mois plus tard), UT1 est donné avec une incertitude de l'ordre de 1 ms (1 milliseconde = 0,001 seconde). Il faut alors corriger la date de tous les évènements repérés sur l'échelle de temps brute.

Si cette échelle de temps pouvait sembler suffisante pour la plupart des besoins de l'époque, ses irrégularités avaient été signalées dès 1929. En particulier, en plus de fluctuations aléatoires de la durée du jour, un phénomène gênant avait déjà été détecté : la durée du jour solaire moyen, et donc de la seconde d'UT1, a tendance à augmenter d'une dizaine de millisecondes par siècle, dérogeant ainsi aux principes de pérennité et de stabilité que doit suivre une échelle de temps. Ce ralentissement de la rotation de la Terre est dû à l'attraction de la Lune et provient des pertes d'énergie par les effets de marée. À l'époque des dinosaures par exemple, la durée du jour était d'environ vingt heures. Elle se stabilisera dans quelques milliards dannées, lorsque la Terre présentera toujours la même face à la Lune, soit une durée du jour équivalent à 28 jours actuels ! Il est à noter que c'est à cause du même effet que la Lune nous présente toujours la même face : la Lune étant plus légère, elle s'est stabilisée beaucoup plus rapidement que la Terre.

En tout état de cause, une nouvelle échelle de temps, plus stable, devait être utilisée. En 1956, le Comité International des Poids et Mesures (CIPM) décidait d'utiliser la révolution de la Terre autour du Soleil comme base d'une nouvelle échelle de temps, nommée le Temps des Éphémérides. Cette définition fut ratifiée par la 11ème Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) en 1960.

2.2 Deuxième définition de la seconde (de 1960 à 1967) :

> La seconde est la fraction 1/31.556.925,9747 de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides.

L'échelle de temps qui lui correspond est le ***Temps des Éphémérides*** (TE) :

> Le Temps des Éphémérides TE est obtenu comme solution de l'équation qui donne la longitude moyenne géométrique du Soleil :
>
> $$L = 279°41'48,04\text{”} + 129.602.768,13\text{”}T + 1,089\text{”}T^2$$
>
> où T est compté en siècles juliens de 36525 jours des éphémérides. L'origine de T est datée le 0 janvier 1900 à 12h TE, à l'instant où la longitude moyenne du Soleil a pris la valeur 279°41'48,04”.

En fonction du temps idéal T de la mécanique, la longitude moyenne géométrique du Soleil est donc exprimée par une équation du second degré : il y a identification entre ce paramètre T de l'équation et TE.

2.2.1 Détermination du Temps des Éphémérides :

Théoriquement, la détermination du temps des éphémérides est obtenue en mesurant la position du Soleil par rapport à des étoiles de coordonnées connues.

Pratiquement, une telle mesure ne peut évidemment pas être effectuée directement. En fait, la détermination de TE était réalisée en mesurant la position de la Lune par rapport à des étoiles de coordonnées connues, après avoir étalonné cette horloge secondaire par rapport au mouvement en longitude du Soleil.

2.2.2 Incertitude sur la détermination du Temps des Éphémérides :

Le principal inconvénient de TE réside dans le fait qu'il faille attendre au moins un an pour que l'imprécision des mesures ne soit pas excessive (de l'ordre de 0,1 s). Il est donc déterminé, à court terme, avec une précision nettement moins bonne que UT.

Par contre, il offre l'avantage d'une très bonne stabilité à long terme : de l'ordre de quelques 10^{-9} (soit 1 seconde en 10 ans).

On peut remarquer que la définition de la seconde de TE fait intervenir la trop abstraite année tropique 1900, et semble en contradiction avec les propriétés de pérennité et d'accessibilité-universalité que doit respecter une échelle de temps. En fait, son utilisation a été limitée aux seuls besoins astronomiques et n'a jamais été employée dans la vie courante.

De plus, dans les brèves années où TE était l'échelle de temps officielle (et même avant), les progrès technologiques accomplis dans la conception et la réalisation d'horloges atomiques laissait prévoir un avenir

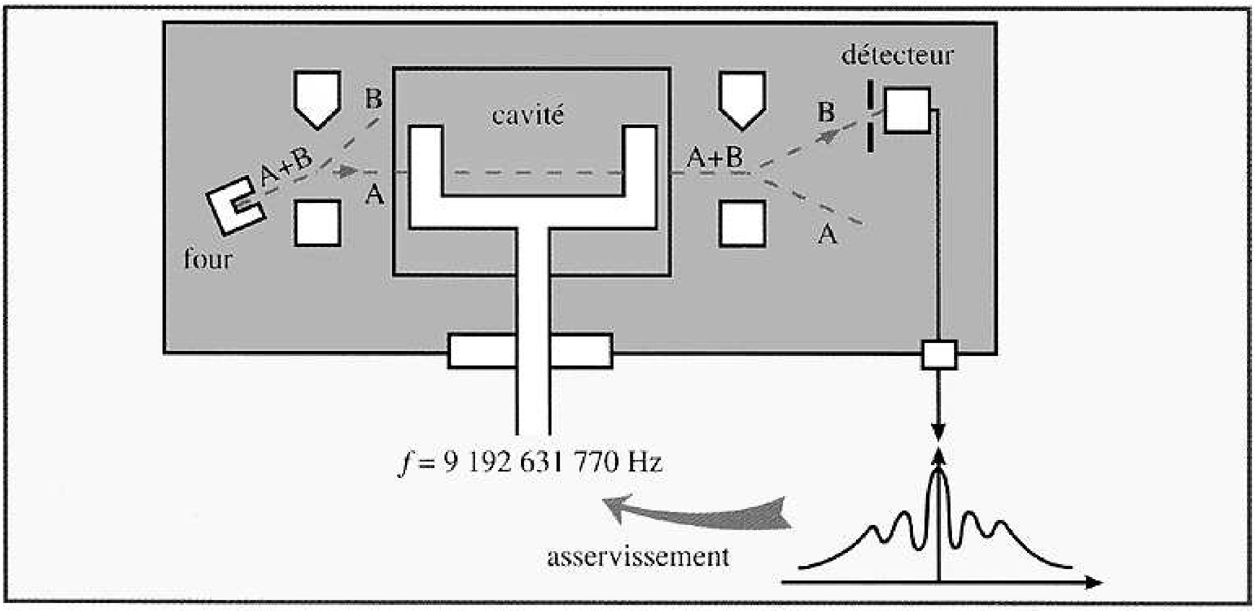


FIG. 2: schéma de principe d'une horloge atomique à jet de césium

limité à cette échelle de temps. En effet, en 1967, l'exactitude des horloges atomiques atteignait 10^{-12} (1 seconde en 30000 ans !), ce qui décida la $13^{\text{ème}}$ Conférence Générale des Poids et Mesures à adopter la seconde atomique comme nouvelle unité de temps.

3 Le Temps Atomique

3.1 L'Horloge Atomique à Jet de Césium

Le principe d'une horloge atomique est basé sur un aspect fondamental de la physique quantique : un atome peut exister sous différents niveaux d'énergie qui sont quantifiés, c'est à dire que l'énergie d'un atome ne peut prendre que des valeurs bien précises, caractéristiques de la nature de l'atome (hydrogène, césium, etc.), et il lui est "interdit" de se trouver entre ces valeurs. Pour faire passer un atome d'un niveau d'énergie à un autre plus élevé (on parle de transition atomique), il doit recevoir un photon (un "grain élémentaire" de lumière) dont l'énergie correspond exactement à la différence d'énergie entre le niveau final et le niveau initial. À l'inverse, pour revenir au niveau d'énergie initial, il doit lui même émettre un photon de même énergie.

Or, l'énergie transportée par un photon est directement proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique associée (à la couleur de la lumière). Par exemple, un photon de lumière violette transporte deux fois plus d'énergie qu'un photon de lumière rouge, qui en transporte plus qu'un photon infrarouge, qui en transporte plus qu'un photon d'onde radio ; rappelons que les ondes radio, même si elles ne sont pas visibles, sont de même nature que la lumière ; seule leur fréquence, nettement plus basse, les distingue.

Puisque les différences d'énergie entre les états d'un atome ont des valeurs parfaitement définies, il en est de même de la fréquence de l'onde électromagnétique pouvant changer leur état, ou pouvant être générée par leur changement d'état. Pour construire une horloge, il suffit donc d'utiliser la fréquence de cette onde électromagnétique et de compter ses périodes. Ainsi, de la même façon qu'une horloge comtoise comptabilise les oscillations de son balancier (en faisant avancer les aiguilles de son cadran à chaque période), ou qu'une horloge à quartz comptabilise les périodes des vibrations de son oscillateur à quartz, une horloge atomique comptabilise les périodes de l'onde électromagnétique ayant provoqué le changement d'état d'atomes (étalons passifs) ou ayant été générée par ce changement d'état (étalons actifs).

L'horloge atomique la plus stable et la plus exacte (elle est exacte par définition, puisque la seconde est définie par rapport à son fonctionnement) est actuellement l'horloge atomique à jet de césium. Son fonctionnement, illustré par la figure 2, peut être résumé de la façon suivante :

1. un oscillateur à quartz génère un signal électrique de fréquence 10 MHz (10 mégahertz, soit dix millions

d'oscillations par seconde) aussi exactement que possible ;

2. un dispositif électronique multiplie la fréquence de base du signal issu de l'oscillateur à quartz pour obtenir un signal dont la fréquence vaut 9.192.631.770 Hz (étage multiplicateur de fréquence) ;
3. ce signal très haute fréquence (on parle de signal hyper-fréquence ou micro-onde) est injecté dans un guide d'onde dont la géométrie est telle qu'il entretient une résonance à cette fréquence particulière (cavité de Ramsey) ;
4. un four envoie un jet d'atomes de césium 133, qui, au départ, se trouvent dans plusieurs états d'énergie différents (symbolisés par état A et état B sur la figure 2) ;
5. un système de déflexion magnétique dévie les atomes qui ne sont pas dans l'état A : seuls les atomes dans l'état d'énergie A pénètrent dans la cavité de Ramsey (étage de sélection d'entrée) ;
6. si la fréquence injectée dans la cavité a très exactement la valeur 9.192.631.770 Hz, un grand nombre d'atomes passe de l'état A à l'état B (phase d'interrogation) ;
7. un second système de déflexion magnétique sépare la direction des atomes dans l'état A de celle des atomes dans l'état B (étage de sélection de sortie) ;
8. un détecteur, placé sur le trajet des atomes dans l'état B, compte le nombre d'atomes reçus (étage de détection) ;
9. en fonction de la réponse du détecteur, un système modifie la fréquence du quartz de telle sorte que le nombre d'atomes détectés dans l'état B soit maximal (boucle d'asservissement).

C'est donc un oscillateur à quartz qui est à la base d'une horloge atomique à jet de césium, les atomes de césium n'étant là que pour contrôler et ajuster la fréquence du signal généré par le quartz : c'est un étalon passif.

Il existe d'autres types d'horloges atomiques : les horloges à rubidium dont les performances sont moindres, les masers à hydrogène passifs et les masers à hydrogène actifs, dont la stabilité à court terme (durées inférieures à un jour) est meilleure que les étalons à césium, mais qui présentent une stabilité à long terme (et une exactitude) moins bonne.

3.2 La Nouvelle Définition de la Seconde et le Temps Atomique International

3.2.1 Troisième définition de la seconde (depuis 1967) :

> 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 Césium 133.

L'échelle de temps qui en découle est le ***Temps Atomique International*** (TAI) :

> Le Temps Atomique International TAI est la coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau International de l'Heure (remplacé maintenant par le Bureau International des Poids et Mesures) 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.

Le TAI est maintenant la référence officielle pour dater les événements.

3.2.2 Détermination du TAI :

1. Chaque laboratoire concerné doit réaliser une échelle de temps atomique locale (accessibilité) : il doit disposer de plusieurs étalons atomiques (pérennité).
2. Les échelles de temps atomique local doivent être intercomparées : chaque laboratoire doit connaître l'avance ou le retard de son échelle locale par rapport à celles d'autres laboratoires.
3. Le TAI est calculé par une moyenne pondérée des diverses échelles de temps atomique locale : le coefficient de pondération est déterminé par les performances (stabilité, exactitude) de chaque échelle locale.
4. Chaque laboratoire reçoit la correspondance entre son échelle locale et le TAI pour la période écoulée (universalité) : tous les événements le concernant peuvent être "redatés" par rapport au TAI.

3.2.3 Intercomparaison des échelles de temps locales :

Il est clair que la réalisation du TAI repose sur l'utilisation d'étalons atomiques très stables et très exacts, mais aussi sur des moyens très performants pour intercomparer les différentes horloges participant à l'élaboration du TAI, et réparties sur toute la surface du globe terrestre.

À l'heure actuelle, c'est surtout grâce à l'utilisation "à l'envers" du Global Positioning System (GPS), que ces intercomparaisons sont réalisées. GPS est à la base un système de localisation : un récepteur GPS qui observe simultanément 4 des satellites GPS peut en déduire ses 3 coordonnées d'espace (latitude, longitude et altitude) et le temps. Les satellites de la constellation GPS sont en effet équipés d'horloges atomiques dont ils diffusent les signaux, et leur position absolue est connue à chaque instant. Un calcul de triangulation permet ensuite de déterminer la position du récepteur.

À l'inverse, considérons maintenant deux stations, munies chacune d'un récepteur GPS et d'une échelle de temps locale. Connaissant précisément la position des deux récepteurs GPS qui datent le même signal issu d'un satellite en vue commune de ces deux récepteurs, il est possible d'en déduire l'écart entre les échelles de temps locales des deux stations.

Une telle intercomparaison est réalisée avec une exactitude de l'ordre de 3 nanosecondes (3 milliardièmes de seconde).

Il existe d'autres méthodes d'intercomparaison qui, bien que nettement plus coûteuses (le prix d'un récepteur GPS est de l'ordre de 2000 F), donnent des exactitudes et surtout des stabilités bien supérieures. Les méthodes "aller-retour", par exemple, consistent à envoyer depuis une première station un signal à un satellite qui le réfléchit sur une deuxième station qui renvoie à son tour un signal vers la première station via le satellite. La stabilité (reproductibilité) de ces méthodes est meilleure que 100 picosecondes (une picoseconde vaut 10^{-12} seconde) mais son exactitude est souvent limitée par une méconnaissance des délais internes, dans les systèmes d'émission, de réception, au sol et dans le satellite, à une valeur de l'ordre de la nanoseconde.

3.2.4 Estimation des instabilités du Temps Atomique International :

Le TAI étant considéré comme l'échelle de temps la plus précise dont nous puissions disposer à l'heure actuelle, et, surtout, le TAI étant l'échelle de temps de référence, il est impossible de mesurer ni sa stabilité ni son exactitude (par rapport à quelle échelle de temps pourrions-nous effectuer une telle mesure !). Par contre, il est possible d'estimer ses caractéristiques en prenant en compte :

1. l'écart de chaque horloge participant au TAI avec le TAI lui-même,
2. les incertitudes de raccordement.

À l'heure actuelle (1998, les valeurs pour 1999 n'étant pas encore connues), la stabilité aussi bien que l'exactitude du TAI sont estimées à 2.10^{-14} (1 seconde pour 1.500.000 ans).

3.3 La révolution du temps atomique

La définition et l'usage du temps atomique a constitué une révolution à plus d'un titre :

- L'échelle de temps (temps-date) est réalisée en "juxtaposant" les unités de temps (temps-durée) d'un étalon de temps-fréquence : avant, l'unité de temps était définie comme la durée d'une subdivision de l'échelle de temps.
- Le TAI cesse d'être une échelle de temps "naturelle" : avant, les échelles de temps se manifestaient directement. Aujourd'hui, il faut utiliser une multitude d'horloges fabriquées par l'homme.
- Le temps devient un problème de physiciens : avant, c'était un problème d'astronomes. Cependant, plusieurs observatoires ont poursuivi leur rôle de "gardiens du temps" en se dotant d'horloges atomiques : c'est le cas notamment de l'observatoire de Besançon, fidèle à sa "vocation horlogère", du Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (BNM-LPTF) de l'observatoire de Paris, qui dispose de l'horloge la plus stable du monde (la fontaine atomique), ainsi que, à l'étranger, de l'observatoire de Neuchâtel (en cours de construction d'une horloge à atomes froids), de l'United States Naval Observatory (USNO), etc.
- Le temps (temps-durée) est la grandeur physique déterminée le plus précisément (quelques 10^{-14}) : c'est la base permettant de redéfinir les unités d'autres grandeurs. Le définition du mètre, par exemple, est basée depuis 1983 sur la distance parcourue par la lumière dans le vide pendant une durée de 1/299.792.458 seconde : c'est donc une mesure de durée qui conditionne la précision des mesures de longueur.

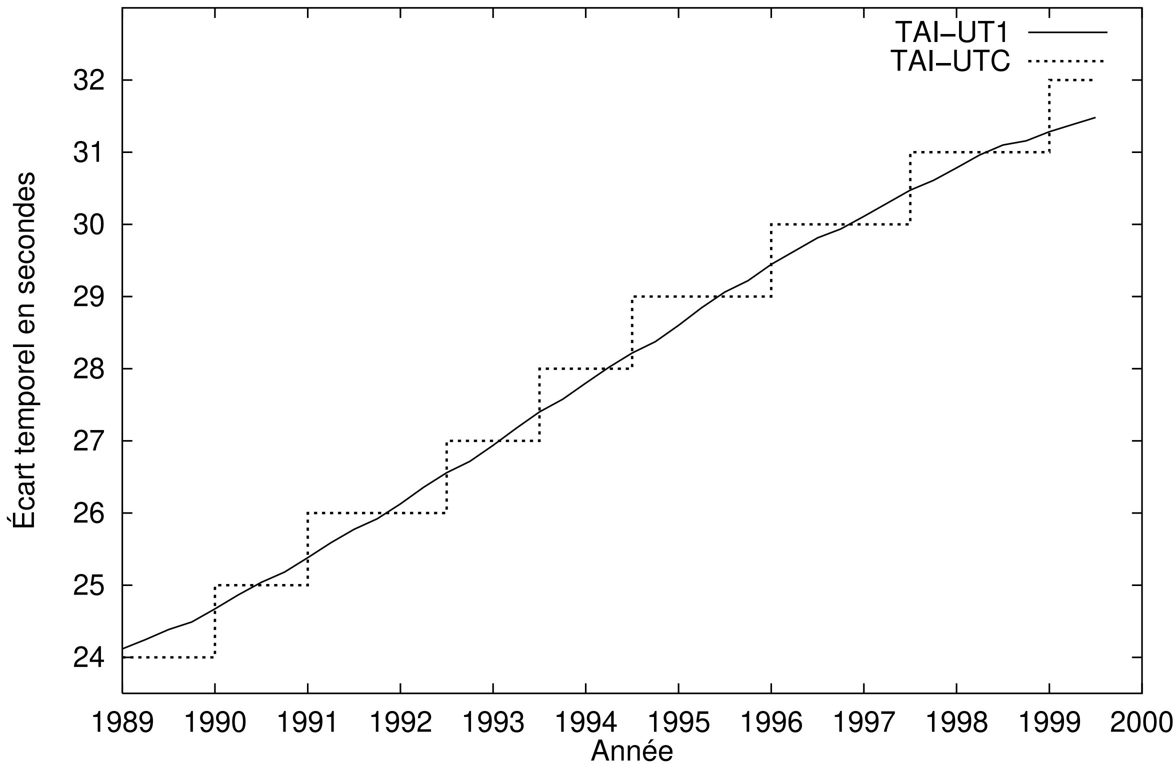


FIG. 3: écarts entre le TAI, UT1 et UTC

L'adoption du TAI a constitué un gain en stabilité et en exactitude de plus de 4 ordres de grandeur par rapport aux précédentes échelles de temps. Une amélioration aussi spectaculaire s'est inévitablement accompagnée de difficultés nouvelles.

De très nombreux effets, qui jusqu'alors étaient complètement négligeables devant les incertitudes liées à la détermination du temps, sont devenus très nettement sensibles. C'est le cas notamment d'effets relativistes. La relativité générale prévoit en effet que le temps s'écoule plus lentement à proximité d'une masse, telle que la Terre par exemple. Par conséquent, il importe de tenir compte de l'altitude d'une horloge (donc de sa distance à la Terre) pour utiliser son temps propre dans le calcul du TAI. De même, il faut corriger leffet dû au "rayonnement du corps noir" : tout corps, à une température donnée, émet un rayonnement de fréquence donnée, par exemple de l'infra-rouge à 20°C, de la lumière rouge à 2000°C (lorsqu'un corps est chauffé au rouge), etc. Le rayonnement émis par l'horloge, à la température du laboratoire, interagit avec londe hyperfréquence et induit un déplacement de la fréquence de transition des atomes de césium. Il faut donc, là aussi, mesurer la température afin de connaître la correction à appliquer au temps local de l'horloge. Une dizaine d'autres effets du même type doivent également être pris en compte pour arriver au degré d'exactitude et de stabilité du TAI.

D'autre part, un autre inconvénient est directement lié aux précisions relatives du TAI et de UT : le TAI se décale par rapport à UT. Pourtant, comme UT est lié à la rotation de la Terre et donc aux alternances jour-nuit, c'est l'échelle de temps qui rythme naturellement nos vies. Il est important qu'une échelle de temps reste en phase avec elle, et que midi ne sonne pas pendant la nuit ! Une alternative a donc été choisie, c'est le ***Temps Universel Coordonné*** (UTC) qui suit le TAI, et possède donc la même stabilité et la même exactitude, sans jamais s'écarter de UT1 de plus de 0,9 seconde. Comment réussir une telle opération ? En ajoutant dès que nécessaire une "seconde intercalaire" à UTC (voir figure 3) ! La dernière seconde intercalaire a été ajoutée entre le 31 décembre 1998 à 23h59m59s et le 1er janvier 1999 à 0h0m0s ; la succession des secondes a été : 23h59m59s, 23h59m60s, 0h0m0s. Cest en fait UTC qui est utilisé pour générer le temps légal de tous les pays.

4 Perspectives

4.1 Le temps des pulsars

À la fin des années 80, après avoir étudié les impulsions reçues par le premier pulsar milliseconde identifié (PSR 1937+21, découvert en 1982), il est apparu que ces astres présentaient les caractéristiques de stabilité nécessaires pour pouvoir constituer une nouvelle échelle de temps astronomique, peut-être plus stable que le TAI.

Un pulsar est une étoile qui, à la fin de sa vie, s'est contractée considérablement pour devenir une étoile à neutrons. Son diamètre ne mesure plus que quelques dizaines de kilomètres, provoquant des effets spectaculaires :

– par conservation du moment cinétique, le pulsar tourne très rapidement sur lui-même (période de l'ordre de la seconde pour les pulsars "standards", de l'ordre de la milliseconde pour les pulsars millisecondes) ;
– son champ magnétique, confiné dans un volume très réduit, et augmenté par magnéto-hydro-dynamique, est très intense.

Les pôles magnétiques captent toutes les particules chargées (électrons, protons) passant à proximité et ces particules piégées émettent des ondes radio par effet synchrotron. Les pôles magnétiques du pulsar se comportent ainsi comme de véritables phares émettant un faisceau d'ondes radio très directionnel.

De plus, comme les pôles magnétiques de l'étoile ne coïncident généralement pas avec les pôles géographiques, ce faisceau tourne dans l'espace, à l'image d'un phare de marine. À chaque rotation, si le faisceau se trouve dirigé vers la Terre, on reçoit une impulsion d'ondes radio, d'où le nom de "pulsar".

À cause du très faible rapport signal sur bruit des observations de pulsars millisecondes, leur stabilité à court terme est très médiocre. Par exemple, dans le cas de PSR 1937+21, dont la période vaut 1,6 ms, on ne peut dater ses impulsions qu'avec une précision de l'ordre de 0,5 ms (1 microseconde vaut un millionième de seconde), soit une stabilité à court terme de 3.10^{-4} seulement.

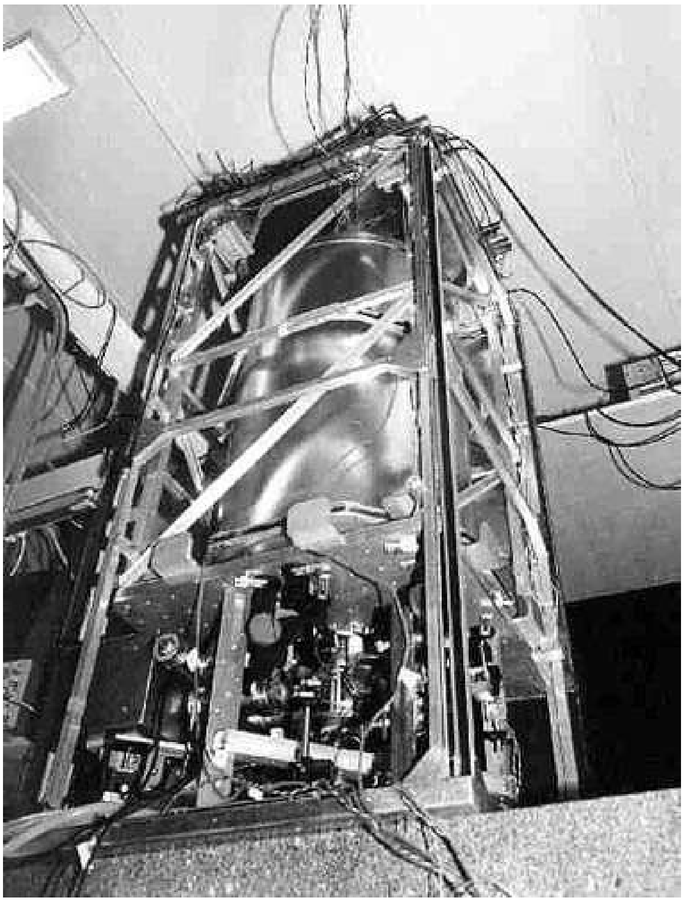
Par contre, leur stabilité à long terme est excellente puisque, toujours dans le cas de PSR 1937+21, on n'a pas perdu le compte des impulsions qu'il a envoyé depuis le moment où il a été découvert. Malheureusement, la cosmologie prévoit que l'univers est baigné par un bruit d'ondes gravitationnelles, qui serait un "écho" du Big Bang. L'effet de ce bruit d'ondes gravitationnelles serait de faire fluctuer aléatoirement la métrique de l'espace-temps de l'univers. Tout se passerait donc comme si la distance entre un pulsar et nous variait de manière aléatoire, induisant des avances ou des retards dans la réception des impulsions. Les théoriciens ont calculé que cet effet serait très lent, et qu'on ne pourrait le détecter que sur des temps très longs (l'effet serait maximal pour une durée égale au temps mis par la lumière pour aller du pulsar jusqu'à nous, soit 15000 ans dans le cas de PSR 1937+21 !). Cet effet pourrait donc limiter la stabilité à très long terme des pulsars millisecondes.

Au sein de l'équipe Temps-Fréquence de l'observatoire de Besançon, nous avons participé à la caractérisation de la stabilité à long terme des pulsars millisecondes, notamment PSR 1937+21 et PSR 1855+09. Il n'a été possible que de fixer une limite supérieure aux instabilités à long terme de ces deux "horloges astronomiques". Suivant nos résultats, leur stabilité serait meilleure que celle du TAI uniquement pour des durées comprises entre 6 mois et un an : avant 6 mois les instabilités à court terme dominent, après un an les instabilités à long terme commenceraient à se manifester.

Ces conclusions ne sont pas définitives car la durée de la séquence d'impulsions étudiée était très courte (de l'ordre de 10 ans) pour mettre en évidence de façon sûre des instabilités à très long terme. D'autre part, l'étude du mouvement orbital des pulsars binaires semble aussi une piste très prometteuse et pourrait permettre d'envisager une autre échelle de temps. Cependant, il faut aussi considérer que la stabilité du TAI ne cesse de s'améliorer, et pourrait encore gagner un ordre de grandeur dans les années à venir grâce aux progrès réalisés dans les nouvelles générations d'horloges.

4.2 La nouvelle génération d'horloges atomiques

Une des causes majeures d'instabilité des horloges atomiques réside dans l'agitation thermique des atomes utilisés (la température est en fait une mesure de l'agitation désordonnée des atomes). La vitesse d'agitation des atomes conduit à modifier la fréquence de transition atomique par effet Doppler. Cet effet peut être résumé de la façon suivante : imaginons que nous voulions mesurer la fréquence d'un signal émis par une source en mouvement (ou, ce qui revient exactement au même, par une source immobile, l'observateur étant en mouvement) et dont la fréquence vaut exactement f_0 ; si la source s'approche de nous, nous mesurerons une fréquence plus élevée que f_0 ; si, au contraire, la source s'éloigne, mous mesurerons une fréquence plus basse que f_0 (cet effet est couramment utilisé pour mesurer des vitesses, en particulier celle des automobilistes !). Par conséquent, si, du fait de l'agitation thermique, un atome de césium se déplace dans la cavité de Ramsey, il verra une modification de la fréquence du signal micro-onde injecté dans cette cavité. On parle alors d'un élargissement de la fréquence de transition atomique : si la fréquence micro-onde est très légèrement inférieure à la fréquence



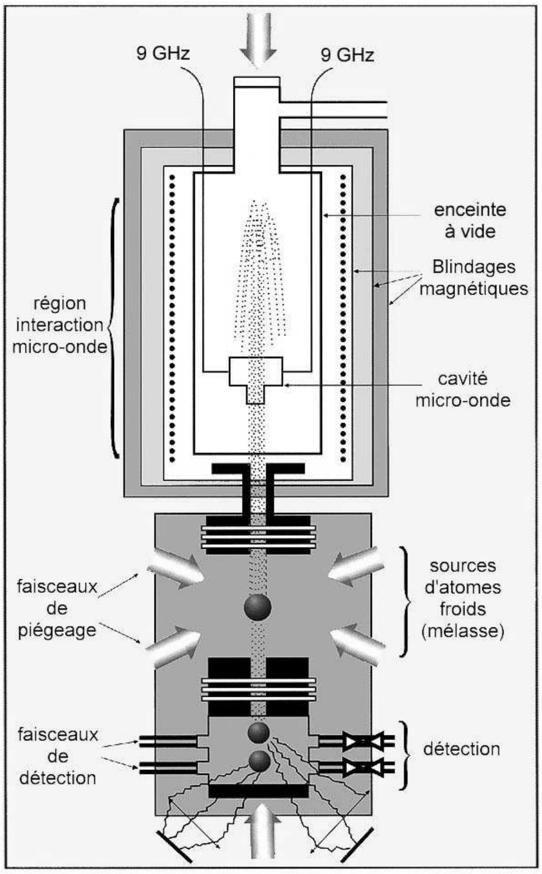


FIG. 4: la fontaine atomique du BNM-LPTF (1,2 m de haut), à gauche, et son schéma de principe, à droite

de transition, elle interagira avec les atomes s'éloignant de la cavité ; si elle est très légèrement supérieure, elle interagira avec les atomes s'approchant. Le rôle de "contrôleur de fréquence" assuré par les atomes est par conséquent moins précis.

L'idéal serait donc d'utiliser des atomes à une température proche du zéro absolu (0 Kelvin = -273°C). Malheureusement, l'intensité du jet d'atomes est directement lié à la température du four les éjectant. Il faut donc refroidir les atomes, après les avoir éjectés du four par chauffage. Le principe utilisé est le refroidissement par irradiation laser. Il est basé sur le fait qu'un atome, lorsqu'il absorbe un photon correspondant à une de ses transitions atomiques, subit une impulsion qui tend à le pousser dans la direction et le sens du photon qu'il vient d'absorber. Imaginons un faisceau laser, horizontal, dont la fréquence est très légèrement inférieure à une fréquence de transition d'un atome. Si un atome, éclairé par le laser, est immobile, il n'interagit pas avec le faisceau et reste donc immobile. Si, par contre, il s'approche de la source laser, il voit la fréquence du faisceau comme étant égale à sa fréquence de transition (encore l'effet Doppler). Il absorbe un photon et subit une impulsion dans le sens opposé à son mouvement : il est donc freiné. En ajoutant un deuxième faisceau laser dans le sens opposé, un autre couple de laser dans la direction horizontale perpendiculaire (un dans un sens, l'autre dans le sens opposé), et enfin, un dernier couple de laser dans la direction verticale, on réalise une "mélasse optique" et l'atome est freiné quels que soient la direction et le sens de sa vitesse. De plus, cet effet se conjugue avec un autre effet quantique, appelé l'effet Sisyphe, qui a tendance à confiner encore plus les atomes. On arrive par ce procédé à refroidir les atomes à une température de 2 micro-Kelvin (1 μK vaut un millionième de degré Kelvin), soit une vitesse moyenne d'agitation de 1,5 cm.s^{-1}.

L'horloge à fontaine d'atomes de césium refroidis par laser, qui fonctionne au BNM-LPTF de l'observatoire de Paris, utilise cet effet (voir figure 4). Outre le refroidissement des atomes, la principale différence avec une horloge à césium classique réside dans le fait que le jet d'atomes n'est pas continu : on lance une "boule d'atomes" refroidis (environ 10 millions d'atomes dans un volume d'un cm^3), on attend qu'ils retombent, puis, environ une seconde après, on en lance une suivante, etc.

La stabilité de cette horloge a été évaluée à environ 5.10^{-16} sur une journée. Certaines améliorations prévues pourraient même lui permettre de descendre à une valeur de 10^{-16} (10 picosecondes par jour). Lorsque plusieurs horloges du même type (une dizaine sont actuellement en cours de réalisation, notamment en France, en Suisse, aux USA, au Japon ...) interviendront dans le calcul du TAI, la stabilité de ce dernier en sera grandement améliorée. Il est aussi à noter qu'une version spatiale d'une horloge à atomes refroidis (PHARAO), à laquelle sera adjoint un maser à hydrogène, devrait prochainement être embarquée à bord de la Station Spatiale Internationale afin de permettre des transferts de temps avec une précision de l'ordre d'une dizaine de picosecondes (projet ACES, Atomic Clock Ensemble in Space).

5 Utilité d'une échelle de temps ultra-stable

Sachant que dans la plupart des activités de la vie courante, telles que prendre un train, par exemple, une précision de l'ordre de la minute sur la détermination du temps est suffisante, on est en droit de se demander quelle est l'utilité d'une échelle de temps dont l'exactitude et la stabilité sont de l'ordre de quelques 10^{-15} (soit un dixième de nanoseconde par jour).

En fait, bien qu'on en soit rarement conscient, un grand nombre d'applications utilise des bases de temps très précises. Certaines techniques n'auraient même pas pu voir le jour si nous ne pouvions déterminer le temps avec une aussi grande exactitude.

Les progrès en télécommunications, par exemple, sont indissociables des progrès de la mesure du temps et des fréquences. On peut être sceptique en associant l'idée de progrès au téléphone portable, mais il n'en demeure pas moins que l'oscillateur interne d'un tel appareil doit avoir des qualités suffisantes pour que son canal d'émission “n'empiète” pas sur les canaux voisins attribués à d'autres utilisateurs. De plus, de nombreuses communications, notamment par satellite, sont maintenant multiplexées : c'est à dire que sur une même ligne on fait transiter plusieurs conversations. L'opération consiste à “comprimer” un fragment de conversation durant, par exemple, une seconde, et à le transmettre dans la ligne pendant par exemple 10 ms. De l'autre côté de la ligne, il faudra “décomprimer” le signal et le transmettre à qui de droit. Il est clair que la synchronisation entre le poste d'émission et le poste de réception doit être très grande, sinon les conversations entre les différents interlocuteurs risquent de se mélanger !

Une deuxième application qui commence à devenir presque grand public concerne le positionnement et l'aide à la navigation. Les avions, les bateaux, et même des automobiles sont aujourd'hui équipés de récepteur GPS permettant en temps réel de connaître leur position avec une précision de l'ordre de la dizaine de mètres. Ceci ne serait pas possible si les satellites de la constellation GPS ne possédaient pas une horloge atomique à leur bord.

Enfin, la recherche fondamentale, et particulièrement l'astronomie, ont des besoins sans cesse grandissants dans le domaine de la mesure du temps et des fréquences. Les tests de la théorie de la relativité, par exemple, exigent des échelles de temps possédant une grande stabilité à long terme. La radio-astronomie VLBI (Very Long Base Interferometry), dont le principe consiste à faire interférer des signaux reçus par des radio-télescopes distants de plusieurs milliers de kilomètres de façon à avoir la résolution d'un radio-télescope dont le diamètre correspondrait à cette distance (on atteint couramment des résolutions de l'ordre du millième de seconde d'arc), nécessite de mesurer la phase de l'onde reçue avec une très grande précision (grâce à un maser à hydrogène) et une très bonne synchronisation des deux sites concernés. Enfin, citons l'application la plus exigeante vis à vis des échelles de temps : l'étude des pulsars millisecondes.

Références

[1] C. Audoin and B. Guinot. Les fondements de la mesure du temps. Masson, Paris, 1998.

[2] F. Vernotte. Les échelles de temps naturelles. In Premier colloque transfrontalier, pages 199–202, Besançon, 1993.

[3] M. Granveaud. Échelles de temps atomique. Collection des monographies BNM, Paris, 1986.

[4] A. Danjon. Astronomie générale. J. et R. Sennac Éditeurs, Paris, $2^{\text{ème}}$ edition, 1959.

[5] Chronos, editor. La mesure de la fréquence des oscillateurs. Masson, Paris, 1991.

[6] J. Vanier and C. Audoin. The quantum physics of atomic frequency standards, volume 1-2. IOP Publishing Ltd, Bristol et Philadelphie, 1989.