

Réalisation pratique de la définition de l'unité de temps

1 Horloges atomiques

La définition de la [seconde](#) doit être comprise comme la définition de l'unité de [temps propre](#) : elle s'applique dans un petit domaine spatial qui accompagne l'atome de césium dans son mouvement.

Dans un laboratoire assez petit pour que la non-uniformité du potentiel gravitationnel ait des effets négligeables par rapport à l'incertitude de la réalisation de la seconde, la seconde propre s'obtient en apportant une correction pour la vitesse de l'atome dans le laboratoire d'après la théorie de la relativité restreinte. Il n'y a pas lieu de faire de correction pour le champ gravitationnel ambiant.

De même, cette définition se réfère à des atomes non perturbés, au repos, à une température de 0 K.

1.1 Étalons primaires de fréquence

Un petit nombre de laboratoires nationaux de métrologie réalisent l'unité de temps avec une exactitude ultime. Pour cela, ils conçoivent et construisent des étalons de fréquence qui produisent des oscillations électriques dont la fréquence est connue avec une incertitude très faible par rapport à la fréquence de transition de l'atome de césium 133 qui définit la seconde. Pour ces **étalons primaires de fréquence**, les différents décalages de fréquence, y compris ceux dus à l'effet Doppler relativiste lié au mouvement des atomes, au rayonnement thermique de l'environnement (décalage dû au rayonnement du corps noir) et à plusieurs autres effets liés à la conception et au fonctionnement des horloges, sont estimés et corrigés.

En 2013, les meilleurs de ces étalons primaires délivrent la seconde du SI avec une incertitude-type relative de quelques 10^{-16} .

Il convient cependant de noter qu'à de tels niveaux d'exactitude, on ne peut plus ignorer l'effet de la non-uniformité du champ gravitationnel sur des distances de l'ordre de la taille de l'appareil. L'étalon doit alors être traité dans le cadre de la relativité générale pour fournir le temps propre en un point spécifié (un connecteur, par exemple).

1.2 Représentations secondaires de la seconde

Une liste des fréquences étalons recommandées comme représentations secondaires de la seconde est maintenue depuis 2006 : elle est disponible à l'adresse <http://www.bipm.org/fr/publications/mep.html>.

Cette liste comprend les valeurs recommandées des fréquences ainsi que les incertitudes-types associées pour la transition micro-onde du rubidium et pour quatorze transitions optiques. Ces **étalons secondaires de fréquence** présentent une exactitude intrinsèque de quelques 10^{-18} ; les incertitudes fournies dans la liste sont néanmoins de l'ordre de quelques 10^{-14} à 10^{-15} en raison de la limite imposée par le lien à un étalon primaire au césium.

1.3 Autres étalons de fréquence

Les étalons primaires de fréquence permettent d'étalonner la fréquence d'autres étalons de fréquence, utilisés comme horloges dans les laboratoires horaires nationaux. Il s'agit généralement d'**horloges commerciales à césium** qui se distinguent par une très bonne stabilité de fréquence à long terme : capables de conserver une fréquence avec une stabilité relative meilleure que 10^{-14} sur plusieurs mois, elles constituent d'excellents 'garde-temps'. Leur incertitude relative de fréquence est de l'ordre de 5×10^{-13} lorsqu'elles fonctionnent de manière autonome.

Les laboratoires de métrologie du temps utilisent aussi des **masers à hydrogène**, fondés sur la transition hyperfine de l'atome d'hydrogène à 1,4 GHz. Les masers ont une stabilité de fréquence à court terme bien supérieure à celle des horloges commerciales à césium. Ces instruments sont donc utilisés pour toutes les applications nécessitant une référence stable pour des intervalles de temps inférieurs à un jour (stabilité de fréquence relative de l'ordre de 1×10^{-15} pour des moyennes de quelques heures).

2 Comparaison d'horloges

La [synchronisation des horloges](#) fonctionnant dans des laboratoires distants est aussi une préoccupation importante de la métrologie du temps. Elle nécessite des méthodes de comparaison horaire exactes et pouvant être mises en œuvre partout sur la Terre et à n'importe quel moment. Dans le cadre de la relativité générale, la notion de synchronisation est arbitraire et l'on fait usage d'une convention pour la simultanéité et la synchronisation.

Les systèmes globaux de navigation par satellite (GNSS) fournissent une solution satisfaisante au problème des comparaisons horaires à distance. Les deux systèmes en orbite conçus pour le positionnement, le système américain Global Positioning System (GPS) et le système russe de navigation par satellite (GLONASS), constitués respectivement de trente et vingt-quatre satellites à défilement, ont la particularité de disposer à bord d'horloges atomiques qui diffusent des signaux horaires. Le signal reçu d'un satellite dans un laboratoire permet de déterminer la différence de temps entre l'échelle de temps locale et le temps du GNSS avec une incertitude de type A de quelques nanosecondes, sur une moyenne de quinze minutes. Les récepteurs modernes permettent de recevoir les signaux de plusieurs satellites en même temps et d'utiliser les signaux transmis sur les deux fréquences porteuses. Dans le passé, il était indispensable de collecter les données dans deux laboratoires par observation strictement simultanée du même satellite afin de pouvoir les comparer. L'analyse des vues simultanées présente encore certains avantages, mais l'usage d'éphémérides très précises des satellites et de paramètres ionosphériques, disponibles en temps différé, ne la rend plus nécessaire dans le cas des comparaisons d'horloges utilisant le GPS. Il est également possible d'effectuer des moyennes d'une série d'observations dans chaque laboratoire et de calculer les écarts entre les échelles de temps locales à partir des différences de ces valeurs moyennes.

Le GPS est utilisé de manière régulière pour lier les laboratoires nationaux d'un grand nombre de pays. Suite au déploiement de la constellation des satellites du GLONASS, il a été possible, en octobre 2009, d'établir un lien horaire officiel entre deux laboratoires en utilisant les satellites du GLONASS selon la méthode des observations simultanées; du fait de la disponibilité dans nombre de laboratoires de récepteurs conçus pour l'acquisition des signaux du GPS et du GLONASS, six liens de ce type existent en 2013.

Les techniques de comparaison de temps et de fréquences par satellite par aller et retour sont utilisées régulièrement pour comparer plus de dix centres horaires dans le monde. Elles sont fondées sur la transmission quasi-simultanée de signaux radiofréquence entre deux laboratoires de temps, avec relais sur un satellite géostationnaire. Ces méthodes permettent d'accéder à une exactitude meilleure que la nanoseconde quasiment en temps réel (typiquement par moyenne sur deux minutes de mesure).

Toutes ces méthodes de comparaison de temps sont soumises à des effets relativistes pouvant engendrer des corrections de l'ordre de plusieurs dizaines de nanosecondes, dont il est indispensable de tenir compte.

3 Échelles de temps

Les laboratoires nationaux possèdent généralement plusieurs horloges, fonctionnant de manière autonome, dont les données sont combinées afin de construire une échelle de temps pérenne. Cette échelle est plus stable et plus exacte que n'importe laquelle des horloges qui y contribue. Elle est fondée sur les résultats des comparaisons d'horloges effectuées localement dans le laboratoire. Ces échelles de temps atomiques sont généralement désignées par $TA(k)$ pour le laboratoire k .

La combinaison optimale de l'ensemble des données de comparaisons d'horloges maintenues dans les laboratoires de métrologie du temps permet d'établir une échelle de temps de référence mondiale, le [Temps atomique international \(TAI\)](#), échelle qui a été approuvée par la CGPM à sa 14^e réunion en 1971 (Résolution 1 ; CR, 77 et *Metrologia*, 1972, **8**, 35). La première définition du TAI est celle qui a été proposée au Comité international des poids et mesures (CIPM) par le CCDS¹ en 1970 (Recommandation S 2 ; PV, **38**, 110 et *Metrologia*, 1971, **7**, 43) :

Le Temps atomique international est la 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.

Dans le cadre de la relativité générale, le TAI doit être vu comme une coordonnée temporelle (ou temps-coordonnée), dont la définition a été complétée comme suit (déclaration du CCDS, *BIPM Com. cons. déf. seconde*, 1980, **9**, S 15 et *Metrologia*, 1981, **17**, 70) :

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

L'Union astronomique internationale a précisé cette définition dans sa Résolution A4 de 1991², selon laquelle le TAI est une échelle de temps réalisée dont la forme idéale, si l'on néglige un décalage constant de 32,184 s, est le Temps terrestre (TT), lui-même relié à la coordonnée temps du référentiel géocentrique, le Temps-coordonnée géocentrique (TCG), par une marche constante.

¹ Le CCDS a été renommé Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) en 1997.

² Pour de plus amples détails, voir Proceedings of the 21st General Assembly of the IAU, Buenos Aires, *IAU Transactions*, 1991, vol. **XXIB** (Kluwer).

Le CIPM a accepté la responsabilité de l'établissement du TAI, qui fut transféré du Bureau international de l'heure au BIPM le 1^{er} janvier 1988.

Le TAI est obtenu en deux étapes :

- On calcule d'abord une moyenne pondérée de quelque 420 horloges maintenues dans des conditions métrologiques dans environ soixante-dix laboratoires. L'algorithme utilisé est optimisé pour la stabilité à long terme, ce qui nécessite d'observer le comportement des horloges sur des durées suffisamment longues. L'une des conséquences est que le TAI n'est accessible qu'en temps différé, avec quelques semaines de retard. En 2013, la stabilité relative de fréquence du TAI était estimée à 3×10^{-16} pour des durées moyennes de un mois.
- L'exactitude de la fréquence du TAI est ensuite évaluée en comparant son unité d'échelle aux diverses réalisations de la seconde du SI produites par les étalons primaires de fréquence. Ceci nécessite l'application d'une correction pour compenser le décalage relativiste de fréquence entre le lieu de fonctionnement de l'étalon primaire et un point fixe d'une surface équipotentielle (correspondant à un potentiel de gravité choisi conventionnellement) très proche du géoïde en rotation. L'amplitude relative de cette correction est, entre des points fixes sur la surface de la Terre, de l'ordre de 10^{-16} par mètre d'altitude. En 2013, l'écart relatif entre l'unité d'échelle du TAI et la seconde du SI sur le géoïde en rotation était de quelques unités de 10^{-16} et il était connu avec une incertitude-type d'environ 3×10^{-16} . Ces valeurs numériques varient d'un mois à l'autre et sont publiées dans la [Circulaire T du BIPM](#). On diminue cet écart, si nécessaire, en pilotant la fréquence du TAI par l'application de corrections d'une amplitude relative de quelques unités de 10^{-16} , tous les mois. Ce procédé ne dégrade pas la stabilité de TAI à moyen terme tout en améliorant son exactitude.

Le TAI n'est pas diffusé de façon directe dans la vie courante. Les temps légaux (diffusés par radio, télévision, horloge parlante, etc.) sont donnés dans une échelle de temps appelée Temps universel coordonné (UTC), comme l'a recommandé la CGPM lors de sa 15^e réunion en 1975 dans sa Résolution 5 (CR, 104 et *Metrologia*, 1975, **11**, 180). L'UTC est défini de telle façon qu'il diffère du TAI d'un nombre entier de secondes ; la différence est telle que $UTC - TAI = -35$ s au moins jusqu'au 1^{er} janvier 2014. Cette différence peut être modifiée de 1 s par l'emploi d'une [seconde intercalaire](#), positive ou négative, afin que l'UTC reste en accord avec le temps défini par la rotation de la Terre, le Soleil croisant le méridien de Greenwich au midi de l'UTC, à mieux que 0,9 s près en moyenne sur une durée de un an. De plus, les temps légaux de la plupart des pays sont décalés d'un nombre entier d'heures par rapport à l'UTC afin d'établir les fuseaux horaires et l'heure d'été.

Les laboratoires nationaux qui contribuent à l'élaboration du Temps atomique international par le BIPM maintiennent une approximation de l'UTC, désignée par $UTC(k)$ pour le laboratoire k , et dans certains cas celle-ci sert de fondement aux temps légaux de ces pays. L'UTC est disséminé chaque mois par la publication des écarts [$UTC - UTC(k)$], donnés de 5 en 5 jours. Ces écarts sont de quelques dizaines de nanosecondes seulement pour environ vingt laboratoires parmi les soixante-dix participants. Depuis janvier 2005, les incertitudes sur ces écarts sont aussi publiées dans la *Circulaire T* du BIPM.

Le calcul de l'UTC sert de fondement à la comparaison clé [CCTF-K001.UTC](#), définie dans le cadre de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM (CIPM MRA) : les écarts $[UTC - UTC(k)]$ et leurs incertitudes constituent alors les degrés d'équivalence des laboratoires participant à la [comparaison clé](#).

dernière mise à jour : 1^{er} juin 2013