

François Vernotte – Nice, 10 novembre 2023

Retranscription de l'entretien avec Noël Dimarcq

Noël Dimarcq est directeur de recherches au CNRS. Il a été «Project Scientist» de la mission spatiale ACES – Atomic Clock Ensemble in Space. Entre 2006 et 2014, il a dirigé le laboratoire SYRTE – Systèmes de Référence Temps-Espace (Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, LNE), puis en 2011, le réseau FIRST-TF dans le domaine de la métrologie du temps et des fréquences, réseau labellisé Laboratoire d'Excellence dans le Programme Investissements d'Avenir. Aujourd'hui il est membre titulaire du Bureau des longitudes, Président de la CCTF Task Force on Updating the Roadmap for the redefinition of second (CCTF-TFU), et Vice-Président recherche et innovation, Université Côte d'Azur.

François Vernotte : Quels sont les changements significatifs intervenus depuis 1956 dans la métrologie du temps ? (aussi bien scientifique, technique, institutionnels, industriels...)

Noël Dimarcq : L'adoption du Temps des Éphémérides en 1956 par la CIPM avait pour but d'améliorer la stabilité de la réalisation de l'unité de temps. Il avait été remarqué dans les années 1930 que la rotation de la terre, qui était alors à la base de la définition de l'unité de temps, présentait des variations notables. Il a alors été décidé de se référer à la durée de l'année pour définir le temps parce que cette dernière était plus stable que la durée du jour. C'est l'année tropique¹ 1900 qui fut choisie comme référence, cette année étant déjà une année de référence pour les astronomes. Mal-

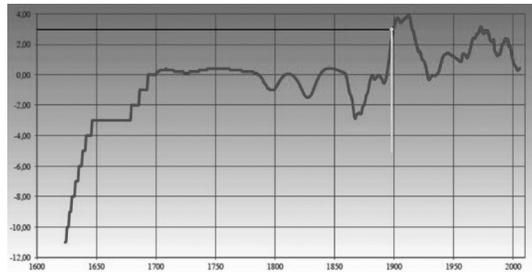


Illustration 1. Variation de la durée du jour solaire moyen (en ms) au cours des siècles précédents.

l'année 1930 que la rotation de la terre, qui était alors à la base de la définition de l'unité de temps, présentait des variations notables. Il a alors été décidé de se référer à la durée de l'année pour définir le temps parce que cette dernière était plus stable que la durée du jour. C'est l'année tropique¹ 1900 qui fut choisie comme référence, cette année étant déjà une année de référence pour les astronomes. Mal-

¹ L'année tropique, ou année équinoxiale ou encore année solaire, correspond à la périodicité des saisons terrestres : elle est définie comme l'intervalle de temps au bout duquel la position apparente du Soleil vue de la Terre, définie par la longitude moyenne du Soleil sur son orbite apparente, revient à la même valeur. FV, d'après wikipedia (entrée : année tropique).

heureusement, il se trouve que ce choix n'était pas idéal parce qu'on comprendra plus tard qu'elle présentait un biais statistique dans sa durée (voir illustration 1). Ce biais va avoir une conséquence importante : puisque la durée du jour solaire moyen en 1900 était plus longue que lors des autres années, la durée de l'année 1900 exprimée en jours solaires moyens apparaît plus courte et donc la seconde de Temps des Éphémérides, calculée comme une fraction de l'année 1900, également. Lors de l'adoption de la seconde atomique en 1967, il a fallu assurer une stricte continuité de cette durée par rapport à la définition précédente, c'est à dire à la seconde des éphémérides qui était trop courte parce que basée sur la durée d'une année qui n'était pas nominale, d'où les problèmes de dérive qui ont conduit à mettre en place le mécanisme des secondes intercalaires (voir note de bas de page n°6).

FV : Dirais-tu que la définition de 1956 a été un peu prématurée, surtout à une époque où les premières horloges atomiques existaient déjà et montraient leur très fort potentiel d'amélioration ?

ND : Il faut se rendre compte qu'à l'époque déjà, un véritable débat s'est engagé entre les astronomes et les physiciens, les premiers voulant faire reposer la définition sur la phase d'un phénomène astronomique, c'est à dire donner la primauté au Temps des Éphémérides, alors que les derniers voulaient faire reposer la définition sur la fréquence réalisée par les horloges atomiques et fixée par la physique quantique, ce qui constituait un véritable changement de paradigme !

FV : Effectivement, le passage du Temps des Éphémérides au Temps Atomique International (TAI) constitue une sorte de renversement puisque, auparavant, que ce soit avec le temps solaire moyen ou le Temps des Éphémérides, on définissait déjà l'échelle de temps dont on extrayait ensuite la définition de la seconde alors qu'avec le temps atomique, on définit d'abord la fréquence de la transition à la base du fonctionnement de l'horloge ou, ce qui revient au même, la durée (c'est-à-dire l'inverse de la fréquence) de la seconde pour constituer ensuite l'échelle de temps atomique en juxtaposant la succession des secondes atomiques !

ND : Oui et ceci a alimenté beaucoup de discussions de 1956 à 1967. Pour autant, je ne pense pas qu'on puisse parler de décision prise rapidement. D'ailleurs, on peut faire un parallèle intéressant avec un cas tout-à-fait similaire pour la définition du kg. Jusqu'en 2018, le kg était défini par la masse étalon conservée au BIPM. Mais depuis plusieurs années il avait été remarqué que la masse de tous les étalons secondaires dérivait de la même façon par rapport à la masse de l'étalon primaire, par définition égale à 1 kg, ce qui signifiait que c'était la masse de ce dernier qui changeait avec le temps, entraînant avec lui l'unité de masse ! Il fallait donc baser le kg non plus sur un étalon physique mais sur une constante fondamentale. Deux possibilités co-existaient : définir le kg à partir de la constante de Planck h et le réaliser à l'aide d'une balance de Kibble ou le définir à partir du nombre d'Avogadro N_A et le réaliser à partir d'une sphère de Silicium de 93,6 mm de diamètre. C'est finalement la première de ces deux définitions qui a été retenue par la 26^{ème}

CGPM en 2018. Malheureusement, les différences entre les réalisations du kg effectuées par ces deux méthodes ont conduit à une adaptation de $7 \mu\text{g}$, ce qui n'est pas du tout négligeable ! Une campagne de mesure internationale doit avoir lieu l'année prochaine pour tenter de résoudre ce problème et elle risque de conduire à une nouvelle adaptation. Cela dit, qu'il s'agisse de la définition de la seconde de 1956 ou du kg de 2018, ces problèmes ne peuvent pas être mis sur le compte de la précipitation mais plutôt sur de trop grandes pressions... La règle qui prévaut est toujours : prudence et vérifications multiples et croisées, pas d'urgence ! D'ailleurs cela vaut également pour la situation actuelle de la définition de la seconde atomique d'autant plus qu'il n'existe pas d'application limitée aujourd'hui par la définition actuelle : on réalise couramment des mesures avec une exactitude de 10^{-18} sans s'appuyer directement sur la définition de la seconde dont la réalisation est quant à elle limitée à un niveau d'incertitude de 10^{-16} par l'exactitude des fontaines à atomes de césium refroidis par laser !

FV : Que va changer la nouvelle définition de la seconde pour l'échelle de temps de référence et les laboratoires qui contribuent ?

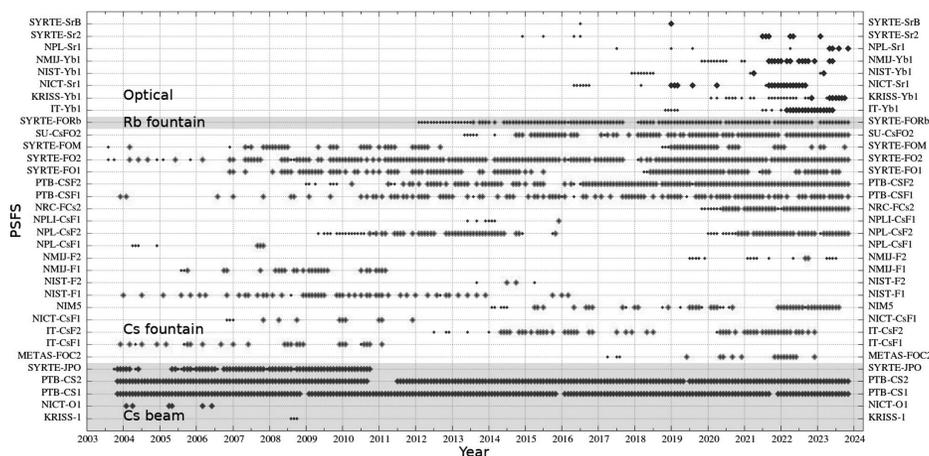


Illustration 2: Étalons primaires et secondaires de fréquence participant au pilotage de l'Échelle Atomique Libre pour réaliser le Temps Atomique International (Crédits : BIPM)

ND : Il n'y aura pas de changement fondamental dans la construction de l'échelle de temps, même si la nouvelle définition doit en principe en améliorer la qualité. Elle sera calculée de la même façon qu'est calculé TAI actuellement, c'est-à-dire à partir d'une Échelle Atomique Libre (EAL) qui est la moyenne pondérée des temps donnés par environ 400 horloges atomiques commerciales participantes (étalons de temps), pilotée par quelques étalons primaires et secondaires de laboratoire (étalons de fréquence), qui assurent la stabilité long terme de l'échelle de temps et l'exacti-

tude de l'intervalle de temps du TAI par rapport à la définition SI de la seconde. La répartition des différents étalons primaires et secondaires permettant de piloter EAL sur la référence de fréquence pour obtenir TAI évolue constamment (voir illustration 2). D'ailleurs, lors du changement de définition de la seconde, l'ensemble des horloges participant à l'EAL sera encore pour longtemps majoritairement constitués d'horloges atomiques Radio-Fréquence (Césium, maser à hydrogène) et un bi-seau s'effectuera entre ces anciennes horloges RF et les nouvelles horloges optiques, même si seules ces dernières deviendront les étalons primaires².

FV : Lors de ta conférence intitulée « Vers une redefinition de l'unité SI de temps »³, tu as présenté les 3 options qui sont envisagées par le CCTF pour servir de base à la future définition de la seconde :

1. une définition basée sur la fréquence de transition d'une espèce atomique (atome ou ion) utilisée dans les horloges optiques (Al⁺, Ca, Hg⁺, Yb, Yb⁺, Sr, etc.)

2. une définition basée sur la moyenne géométrique des fréquences d'un ensemble de transitions de différentes espèces, le poids de chaque transition étant d'autant plus fort que l'incertitude de l'étalon de fréquence correspondant est faible. Deux variantes de cette option sont envisageables :

2.1. l'ensemble de transitions et leurs poids sont fixés au moment de la définition et ne changent plus ensuite ;

2.2. l'ensemble de transitions et leurs poids sont définis au moment de la définition mais ils peuvent évoluer ensuite en fonction de l'émergence de nouvelles horloges optiques et de l'évolution des incertitudes des horloges fonctionnant avec les transitions faisant partie de l'ensemble

3. une définition qui repose sur une constante fondamentale dont la valeur serait fixée.

As-tu personnellement une préférence parmi ces options ?

ND : Il me semble clair que celles qui ont le plus de chance d'aboutir sont les options 1 et 2.1. Un travail extrêmement minutieux d'évaluation des pour et des contre de chaque option est en train d'être mené et ce sont ces 2 options qui sont pour l'instant les mieux placées.

Par exemple, l'option 1 a comme avantage d'être simple puisqu'elle est vraiment semblable à la définition actuelle et ne nécessite que de passer d'une transition RF du Cs à une transition optique d'une autre espèce atomique. En revanche, elle comporte un risque : celui de ne pas choisir la bonne espèce car il n'y en a pas une qui se dégage actuellement au regard de l'exactitude obtenue et son potentiel d'amélioration. En effet une espèce qui semblerait plus judicieuse à exploiter aujourd'hui pourrait s'avérer moins intéressante plus tard à la faveur d'innovations technologiques. Cette option présente en outre une faiblesse : une fois l'espèce

² De la même façon, un certain nombre d'horloges optiques contribue actuellement à TAI en tant qu'étalons de fréquence secondaires. ND

³ Workshop temps-tréquence et technologies quantiques, hôtel Saint-Paul, Nice, 10 novembre 2023. FV

atomique choisie, l'intérêt pour d'autres atomes retombera, compte-tenu des ressources limitées des laboratoires de métrologie, et nous pourrions passer à côté d'améliorations majeures de la définition de la seconde.

En revanche, les avantages et les inconvénients de l'option 2 sont exactement à l'inverse de l'option 1 : elle est plus complexe à comprendre puisqu'elle prend en compte conjointement plusieurs espèces atomiques, même si chaque transition de l'ensemble choisi sera une réalisation primaire autonome de la définition, mais elle aura l'avantage de ne pas miser sur une seule espèce et de favoriser le maintien des recherches sur toutes les espèces concernées.

Pendant, l'idée d'avoir un ensemble de transition et des coefficients de pondération qui pourraient évoluer et être modifiés de temps à autre (à l'occasion des réunions de la CGPM, avec une périodicité à définir) est trop difficile à accepter aujourd'hui. La communauté scientifique, et en particulier métrologique, n'est pas prête à un tel saut conceptuel. Si l'option 2.1 constitue bel et bien une alternative plausible, l'option 2.2 est plus révolutionnaire et son acceptabilité n'est pas acquise. Quant à l'option 3, si elle assurerait une parfaite cohérence au Système International (SI) d'unité puisque le temps serait fixé par une constante fondamentale à l'instar des autres unités, elle se heurte à l'heure actuelle au trop larges domaines d'incertitude avec lesquelles sont connus les différentes constantes. Elle est donc clairement prématurée.

FV : On voit bien que les décisions, in fine, seront prises pour des raisons scientifiques mais aussi politiques voire peut-être même sociétales. Peux-tu nous indiquer comment sont constituées les différentes instances (CGPM, CIPM, CCTF) et, en particulier, comment se partagent les rôles scientifiques et politiques au sein de ces instances ?

ND : La Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) est l'instance décisionnelle. Son rôle est principalement politique. Elle est constituée de délégations représentant chacun des 64 états membres de la Convention du Mètre et des 36 états associés. Les délégations des états-membres étant aussi responsables de la contribution de leur pays au budget du BIPM, les questions budgétaires entrent également dans les attributions de la CGPM. Elle se réunit tous les 4 ans. Elle prend ses décisions sur la base du consensus mais pas forcément à l'unanimité (sauf pour le budget du BIPM).

Le Comité International des Poids et Mesures (CIPM) est une instance à la fois politique et scientifique. Elle est constituée de seulement 18 membres et s'appuie sur les Comités Consultatifs (CC), en particulier le Comité Consultatif du Temps et des Fréquences (CCTF) pour ce qui concerne la définition de la seconde et de l'échelle de temps de référence.

Le CCTF est évidemment beaucoup plus centré sur les aspects scientifiques bien que des considérations politiques y soient également présentes. Par exemple, une décision scientifique qui exclurait de fait certaines parties du monde et/ou qui en favoriseraient d'autres, par exemple le choix d'une technologie qui n'est maîtrisée que par un seul état, ne pourrait être acceptée.

FV : Y a-t-il une tension possible voire réelle entre les dimensions internationales et universelles du temps ?

ND : Non, il n'y a pas de tension de cet ordre. L'universalité est dans l'ADN de la convention du mètre et des instances qui s'y rattachent ce qui se traduit notamment par une volonté jamais démentie de chercher, a minima, à prendre des décisions par consensus dans l'intérêt de tous les états. L'aspect international est donc une des dimensions que revêt cette vision universaliste.

FV : Y a-t-il un juste équilibre entre les progrès scientifiques et techniques d'une part, et les enjeux économiques et sociétaux d'autre part ?

ND : Pas sur la définition de la seconde ni, généralement, sur les autres unités du SI. Les besoins industriels sont souvent très loin des précisions qui correspondent aux réalisations primaires des définitions des unités du SI. En revanche, les impératifs de traçabilité aux étalons nationaux et internationaux impliquent une traçabilité métrologique aux définitions. Dans le domaine du temps fréquence, il y a généralement un fossé, voire un gouffre, entre les incertitudes de mesure industrielles et les capacités des étalons primaires dans les laboratoires métrologiques. Toutefois, il existe des exceptions, comme par exemple l'interopérabilité entre les différents systèmes des Global Navigation Satellite Systems (GNSS) qui requiert que l'échelle de temps de chaque système (GPS, Glonass, Galileo, Beidou, etc.) soit étalonnée sur des fontaines à atomes froids assurant par ailleurs la réalisation primaire de la seconde.

FV : Comment analyses-tu la responsabilité sociétale des chercheurs et institutions de recherche ? Y a-t-il des conflits d'intérêts ? Qu'en est-il de ta propre responsabilité ?

ND : En ce qui me concerne, je n'ai ni conflit d'intérêts, ni responsabilité sociétale directe, si ce n'est le devoir de savoir expliquer la nouvelle définition à tout le monde y compris aux scolaires et au grand public. Les aspects de communication et d'éducation sont donc importants pour tous les CCs, en particulier pour le CCTF quand la définition de la seconde sera changée. Mais il y a effectivement une responsabilité sociétale des structures impliquées dans la métrologie qui dépend de leur niveau d'implication dans la société. C'est évidemment différent si on se place au niveau du BIPM, des National Metrology Institutes⁴ (NMI) ou des Designated Institutes⁵ (DI). Pour le temps fréquence, il s'agit de mettre à disposition

⁴ Le National Metrology Institute (NMI) d'un état est l'organisme ayant la responsabilité de maintenir les étalons de mesure nationaux et de les raccorder au Système International d'unités. En France, par exemple, le NMI est le Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE). FV

⁵ Un « Designated Institute » est un laboratoire chargé par le NMI d'un état de mettre en œuvre la métrologie nationale dans un domaine considéré. En France, le LNE-SYRTE, à l'observatoire de Paris, est le DI pour la métrologie du Temps et des Fréquences. FV

des signaux de référence à destination d'un public plus ou moins large avec une qualité et continuité de service plus ou moins grande et des niveaux d'incertitude également variables. Il s'agit toujours de compromis dans le service entre un bon niveau de précision et une durée de service assuré plus ou moins long : on peut ainsi choisir entre une stabilité de 10^{-17} sur un temps long ou de 10^{-18} sur un temps plus bref. C'est donc de la responsabilité sociétale des laboratoires de développer des étalons à l'état de l'art fournissant des services à l'extérieur du monde scientifique. Pour le DI en Temps-Fréquence, cela implique d'assurer la réalisation et la diffusion en continu du temps légal français sans aucune interruption de service.

À titre d'exemple, on peut considérer la responsabilité du BIPM qui doit diffuser chaque mois la circulaire T qui fournit les différences entre UTC⁶ et les UTC(k)⁷ de chaque NMI (ou DI) contributeur par pas de 5 jours. Mais le BIPM fournit également à ces mêmes laboratoires UTCr (UTC rapide) qui, chaque semaine, établit la différence UTCr et les UTC(k) de chaque NMI avec un pas journalier. Ainsi, la référence est UTC mais UTCr donne un point intermédiaire moins précis (UTCr n'est pas UTC) mais plus fréquent.

Pour assurer un tel service social, il faut impérativement concilier l'état de l'art de la physique et la fiabilité ultime de la métrologie. De la même façon qu'il faut trouver une voie qui va de l'expérience de laboratoire au développement industriel, il faut ici trouver la balance entre les résultats parfois très ponctuels de la recherche et le caractère opérationnel sur le long terme que doit entretenir la métrologie. Et il s'agit bien d'une dialectique : si le côté opérationnel est privilégié, le risque est grand d'être dépassé scientifiquement ; si le côté scientifique est privilégié, le besoin de continuité de service risque d'être rompu. À titre d'exemple, le développement des fontaines atomiques au LPTF⁸ doit énormément au duo formé par Christophe Salomon, physicien/métrologue, et André Clairon, métrologue/physicien.

Il s'agit donc de ne pas rater le virage que nous sommes en train de prendre sur les horloges atomiques : il faut que les individus qui font la science à l'état de l'art et ceux qui produisent les services de métrologie se respectent et travaillent en bonne intelligence.

⁶ Le Temps Universel Coordonné (UTC) est le TAI établi par le BIPM décalé d'un nombre entier de secondes intercalaires pour ne pas s'écarter du temps donné par la rotation de la Terre (UT1) de plus de 0,9 s. La dernière seconde intercalaire a été ajoutée entre le 31 décembre 2016 à 23h59m59s UTC et le 1^{er} janvier 2017 à 00:00:00. Aujourd'hui (2023), UTC=TAI+37s. UTC est à la base du temps légal de chaque état-membre. On pourra se référer à l'article « Temps Universel ou Temps International ? » de Gianna Panfilo, dans le présent numéro des Bachelard Studies, pour de plus amples renseignements sur TAI et UTC. FV

⁷ Alors qu'UTC est un temps « papier », dans la mesure où il est calculé par le BIPM en après coup à partir d'intercomparaisons d'horloges atomiques, chaque UTC(k) est la réalisation physique d'UTC fournie par l'horloge de référence du DI « k ». Ainsi, pour la France, UTC(OP) est la réalisation physique d'UTC fournie par l'horloge atomique de référence de l'Observatoire de Paris. UTC(OP) est le temps légal en vigueur en France. FV

⁸ Le Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences de l'Observatoire de Paris s'est transformé au début des années 2000 en LNE-SYRTE. FV

FV : Quels sont les enjeux sociétaux ou environnementaux du changement de la définition de la seconde ?

ND : Les enjeux sociétaux concernent plus l'abandon, ou plutôt la suspension⁹, des secondes intercalaires (voir note 6) que le changement de définition de la seconde elle-même. La garantie de continuité qu'offre une échelle de temps sans seconde intercalaire présente l'avantage de supprimer les risques de plantage des systèmes informatiques liés à ces événements disruptifs. De même dans le cas des transports, des télécommunications ou de l'énergie, des problèmes importants peuvent survenir parce que des procédures différentes sont activées par les opérateurs le jour où doit être ajoutée cette seconde intercalaire : certains, à l'instar d'UTC, ajoutent une 61^{ème} seconde à la dernière minute de la journée considérée alors que d'autres lissent cette seconde sur toute la journée, ce qui est ingérable pour tous ces systèmes qui réclament des synchronisations bien plus fine que la seconde. Cependant, comme il a été dit plus haut, les secondes intercalaires n'ont pas été abandonnées, les débats politiques autour de cette question n'ayant abouti à aucun consensus. En revanche, il a été (difficilement) accepté d'autoriser des écarts entre UT1, le temps lié à la rotation de la terre sur elle-même, et TAI supérieurs à 1 seconde. On pourrait par exemple imaginer d'ajouter une minute intercalaire chaque fois que cet écart atteint une minute, ce qui devrait se produire environ une fois par siècle, ou, encore mieux attendre un écart d'une heure, ce qui arriverait tous les 4000 ans et nous laisserait le temps de prévoir l'événement !

En comparaison de cette suspension des secondes intercalaires, les enjeux sociétaux liés à la nouvelle définition de la seconde sont bien moins importants. Pourtant, compte-tenu de l'ubiquité de la synchronisation dans beaucoup de domaines d'activité notamment dans tous les réseaux (télécommunications, transports, transactions bancaires, énergie, etc.), on pourrait imaginer que la redéfinition de la seconde aurait d'importantes conséquences. Par exemple, la synchronisation est au cœur des « smart grids » et de la distribution de l'énergie. Une erreur infime de phase (donc de temps) lors de la commutation entre des réseaux électriques pourrait en effet avoir des conséquences très dangereuses. Pourtant, comme la nouvelle définition de la seconde sera établie dans une stricte continuité par rapport à l'ancienne définition, il ne devrait en résulter aucun impact dans ce domaine comme dans les autres.

François Vernotte
FEMTO-ST – Université de Franche-Comté
francois.vernotte@femto-st.fr

Noël Dimarcq
SYRTE – CNRS
Noel.Dimarcq@obspm.fr

⁹ Effectivement, on ne supprime pas en soi les secondes intercalaires ; on autorise juste que la différence entre UTC et UT1 puisse devenir supérieure à 1 seconde afin d'assurer la continuité à UTC sur une durée d'au moins un siècle. ND