

# L'ART DE LA MESURE

Dans un monde en pleine mutation, il faut des ancrages et des repères. C'est le rôle du système international d'unités, socle indispensable au bon fonctionnement des technologies, du commerce, des communications...

Un langage planétaire, quoi! **PAR MARINE CORNIOU**



deux pas des grandes artères routières qui ceignent Paris, le parc de Saint-Cloud et ses allées de marronniers centenaires font l'effet d'un havre de paix. L'ancien domaine royal semble figé hors du temps. On n'a aucun mal à imaginer Louis XIV et sa cour festoyer au pavillon de Breteuil, un bâtiment blanc qui surplombe la Seine. « Ce pavillon a été construit en 1672; il a plus tard été restauré et utilisé par Napoléon Bonaparte, endommagé lors de la guerre contre les Prusses, puis menacé par les bombardements de la Seconde Guerre mondiale », énumère Céline Fellag Ariouet, notre guide pour la journée, en arpentant les jardins en terrasses.

Cette doctorante en histoire des sciences est ici dans son élément, car le lieu a également vu défiler des hordes de savants et de Prix Nobel de physique, de Dmitri Mendeleïev à Marie Curie en passant par Louis de Broglie et Albert A. Michelson. C'est que, depuis 1875, le pa-

villon de Breteuil est le siège du Bureau international des poids et mesures (BIPM), l'une des plus anciennes organisations internationales. Son rôle : conserver, améliorer, diffuser et coordonner le système mondial de mesures.

Si le monde tourne à peu près rond et si les échanges commerciaux sont possibles entre pays, si les industries s'internationalisent, si la médecine et la science sont à ce point avancées, si la planète est connectée, c'est parce que l'humanité mesure tout ce qui est mesurable avec les mêmes unités. Une cohérence qu'on doit au BIPM, qui rassemble aujourd'hui 63 États membres, dont le Canada depuis 1907, et 39 États et économies associés. Son travail est loin d'être achevé : la prochaine grande conférence, qui aura lieu en novembre, abordera des questions fondamentales comme la nécessité de garder le temps des horloges aligné sur la rotation de la Terre – ou pas.

Ce sont le kilogramme, le mètre et la seconde qui ont posé les jalons de la métrologie, la science de la mesure, il y a près de 150 ans. Dans la grande salle du pavillon, aux bibliothèques remplies de vieux volumes de l'Académie des sciences, une solide barre en métal représente le mètre étalon, première référence universelle de longueur. Sur la même table trône sous une cloche en verre un petit cylindre de 3,9 cm de haut et de large. « C'est le prototype international du kilogramme, constitué de 90 % de platine et de 10 % d'iridium », détaille Céline Fellag Ariouet, qui fait justement sa thèse sur l'histoire du BIPM et travaille comme assistante de direction pour l'organisation. Ce cylindre est en fait une copie; l'étalon original, fabriqué en 1889 et surnommé le « grand K », est conservé sous une triple cloche dans un coffre bien gardé du BIPM. L'objet n'en est pas moins émouvant, quand on pense que toutes les balances du monde







ont été calibrées indirectement grâce au grand K. En pratique, six copies servent de références secondaires, mais l'objet initial est la référence suprême, sur laquelle tous les pays se sont alignés pour fabriquer leurs propres étalons.

Ainsi, le système mondial de mesures est une longue chaîne ininterrompue d'étalonnages qui permet au mètre péruvien de mesurer la même chose que le mètre allemand ou au kilo russe de peser autant que le kilo chinois. C'est pareil pour toutes les unités de base, au nombre de sept : le kilogramme, le mètre, la seconde, l'ampère (intensité électrique), le kelvin (température), la candela (intensité lumineuse) et la mole (quantité de matière). C'est à partir de ces grandeurs que sont dérivées une vingtaine d'autres, comme la pression, l'énergie, la puissance, la fréquence...

« Mesurer, c'est comparer avec une référence, rappelle Marc Himbert, directeur scientifique du Laboratoire commun de métrologie (LNE-Cnam), l'un des quatre laboratoires nationaux de métrologie français. Une mesure n'est jamais parfaite ; ce qui est important, c'est d'avoir confiance dans l'estimation qui est faite et de quantifier l'incertitude. On n'aura pas exactement la même valeur partout, mais ce n'est pas grave à condition d'établir les degrés d'équivalence entre les différents pays. »

Chaque pays membre dispose donc d'un laboratoire national de métrologie qui fait office de référence et qui se fie au chef d'orchestre qu'est le BIPM. Certains artefacts et appareils de mesure voyagent ainsi d'un pays à l'autre pour que tout le monde puisse se comparer avec la même base. Chez nous, c'est le Conseil national de recherches du Canada (CNRC), à Ottawa, qui se charge d'accorder les mesures d'un océan à l'autre.

Ces laboratoires de haut niveau possèdent pour chaque unité (ou presque) des prototypes nationaux et calibrent des étalons secondaires pour les laboratoires et industries de leur pays. À leur tour, les étalons secondaires servent de référence aux étalons tertiaires et ainsi de suite. Quand on mesure la température d'un enfant malade, à la maison, le thermomètre a été étalonné grâce à cette « cascade » de

comparaisons successives. Idem quand on pèse ses pommes au marché ou qu'on achète une ampoule à éclairage plus ou moins tamisé.

## DU CHAOS À L'ORDRE

Si ces gestes nous paraissent banals, ils reposent en fait sur des décennies de discussions houleuses, de casse-têtes scientifiques et de procédés méticuleux sans cesse peaufinés. Car uniformiser les mesures dans le monde n'a pas été – et n'est toujours pas – une mince affaire. Le Canada en est d'ailleurs une preuve, avec son maintien têtue des pouces, des livres et des pintes en parallèle des centimètres, kilos et litres... C'est encore pire aux États-Unis, où l'on s'obstine à utiliser le système anglo-saxon dans la vie quotidienne malgré l'adoption officielle du système métrique, ce qui n'est pas sans conséquence. En 1999, la sonde *Mars Climate Orbiter* a été perdue lors de sa mise en orbite autour de la planète rouge à cause d'une bête erreur de conversion d'unités dans le logiciel de navigation. Des ingénieurs de Lockheed Martin, sous-traitant de la NASA, avaient fait leurs calculs de forces avec des livres et non pas des kilogrammes...

C'est pourtant afin de mettre fin au chaos que le système métrique a vu le jour, au sortir de la Révolution française. À l'époque, rien qu'en France, on comptait 800 unités : pieds, pieds du roi, toises, lieues, aunes, arpens, pouces, grains... Pire, d'une ville à l'autre, la valeur de chaque unité variait, si bien qu'on estime que 250 000 références de masse, de volume et de longueur ont pu se côtoyer dans le royaume – une prolifération inventive également observée ailleurs en Europe. Ces variations étaient source d'iniquité, de fraudes... et de grogne populaire.

En 1790, portés par l'élan d'universalité de la Révolution, les savants français ont proposé un système reposant sur le mètre, dont la longueur correspond au dix-millionième du quart du méridien terrestre. Le kilogramme, lui, fut défini comme la masse d'un décimètre cube d'eau à une température précise. L'idée : abandonner les coudées et autres mesures approximatives pour utiliser des dimensions invariables, issues de la nature. Les nouveaux poids et mesures peineront tou-

tefois à s'imposer dans la vie quotidienne, jusqu'à ce que la révolution industrielle force le consensus. « En 1875, 17 nations ont signé la Convention du mètre [le traité fondateur du BIPM]. Ces pays avaient de grandes colonies et représentaient donc une large fraction du monde », indique Martin J. T. Milton, directeur du BIPM depuis 2013.

Loin d'être un long fleuve tranquille, le système international d'unités (SI) n'a cessé d'évoluer. Aux trois premières unités se sont ajoutées de nouvelles références en même temps qu'on découvrait l'électricité, la chimie, les rayonnements ionisants... « Les gens tiennent les mesures pour acquises, souligne Georgette Macdonald, directrice générale du Centre de recherche en métrologie du CNRC. En fait, c'est un système dynamique. Il faut constamment inventer des méthodes de mesure adaptées aux technologies qui arrivent sur le marché ou aux nouveaux défis comme les changements climatiques. Prenons la température des océans par exemple : comment la mesure-t-on ? Où ? Tout cela demande beaucoup de recherche. »

## DÉMATÉRIALISATION

Alors que les technologies se miniaturisent et se complexifient, les mesures doivent être de plus en plus précises. Que ce soit en médecine, en optique, en physique fondamentale, en informatique quantique ou dans n'importe quelle discipline, on jongle davantage avec les microgrammes, les nanomètres et les femtosecondes qu'avec les bons vieux étalons historiques. Si bien qu'au fil des ans les métrologues, qui sont en majorité physiciens, ont dû revoir les définitions de toutes les unités pour qu'elles ne dépendent plus d'objets physiques, par essence imparfaits, « érodables » et disponibles en un seul lieu, comme le grand K. Celui-ci a d'ailleurs perdu 50 microgrammes par rapport à ses copies témoins, malgré les précautions prises pour le protéger.

Pour s'affranchir des objets, il a donc été décidé que les mesures devraient plutôt dépendre de constantes fondamentales de théories physiques, comme la vitesse de la lumière. L'ambition est la même qu'en 1790, mais il aura fallu attendre plus de deux siècles d'avancées théoriques et expérimentales pour y parvenir complètement !

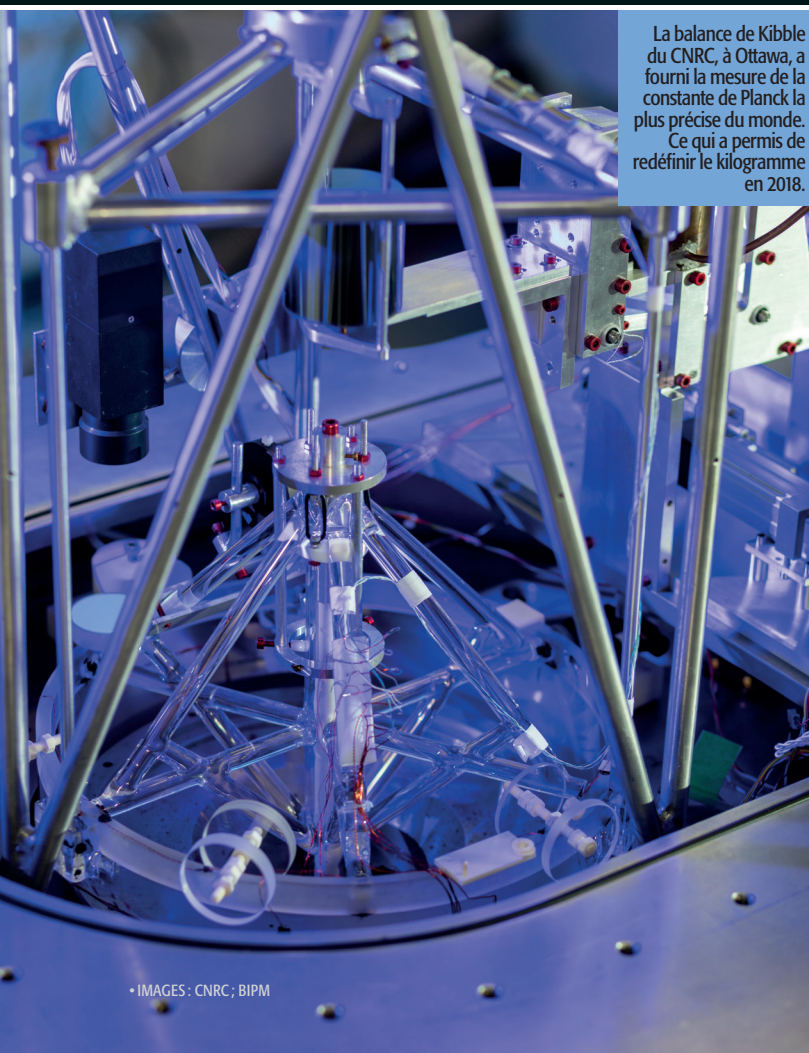




L'horloge à fontaine d'atomes de césium du CNRC fait partie des rares étalons mondiaux primaires pour la seconde. Les atomes de césium sont « lancés » vers le haut de l'enceinte à vide et refroidis par laser. La mesure de fréquence de leurs « oscillations » est effectuée au cours de leur retombée par gravité, d'où le nom de fontaine atomique.



Kilogramme étalon en platine iridié déposé au pavillon de Breteuil, à Sèvres. Il continuera d'exister comme moyen tangible d'élaborer des étalons secondaires, mais plus comme étalon de base.



La balance de Kibble du CNRC, à Ottawa, a fourni la mesure de la constante de Planck la plus précise du monde. Ce qui a permis de redéfinir le kilogramme en 2018.

Le pavillon de Breteuil, siège du Bureau international des poids et mesures





« Dans les années 1960, on a relié la définition du mètre à la longueur d'onde émise par une lampe orange au krypton [un gaz qui émet l'une des radiations avec des lignes spectrales précises] », mentionne Céline Fellag Ariouet devant divers objets de mesure historiques réunis dans un petit musée du BIPM. Depuis 1983, le mètre est plutôt défini comme « la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $1/299\,792\,458$  de seconde ». Il est donc « raccordé » à la seconde, qui a également vu sa propre définition changer en 1967 : elle n'est plus une fraction du jour terrestre, elle est plutôt calculée en fonction des oscillations de certains atomes.

Ce n'est toutefois qu'en 2018 que le kilogramme a pu être « dématérialisé » à son tour, après plus de 20 ans de discussions et d'expérimentations. Adieu, le grand K ! La

masse repose désormais sur une constante de la physique quantique, celle de Planck, qui n'a à priori pas trop de rapport avec le poids des choses, mais tout ici est histoire d'équations. Georgette Macdonald se souvient avec émotion de la réunion qui a acté ce bouleversement. « C'était fantastique, il y avait les représentants politiques, les scientifiques, le physicien qui a eu l'idée de la redéfinition... Plus besoin aujourd'hui d'aller au BIPM pour se caler sur l'étalon. Maintenant, on peut réaliser l'étalonnage dans notre laboratoire pour des masses de un kilogramme, mais aussi directement de un gramme ou moins, car on ne dépend plus d'objets qu'il faut subdiviser. Cela ajoute de la précision dans les petites masses », dit-elle.

Ce sont d'ailleurs le Canada, les États-Unis et la France qui ont contribué, scientifiquement, à cette redéfinition. Car il a d'abord fallu fixer expérimentalement la valeur de la constante de Planck, de la même manière qu'il a fallu établir la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide pour définir le mètre. Et seules les équipes de ces pays ont atteint le seuil de précision nécessaire. « C'est nous qui avons obtenu la mesure la plus précise ! » se félicite Georgette Macdonald.

Pour relier la constante de Planck à la masse, les métrologues ont utilisé deux approches : des sphères de silicium (dans lesquelles on compte le nombre d'atomes pour en déduire indirectement la constante) et des balances du watt ou de Kibble. « Il existe sept ou huit balances de ce type dans le monde », précise Michael Stock, directeur du Département de la métrologie en physique du BIPM. Celle qu'il nous montre consiste en un cylindre de plus de deux mètres de haut, avec des ouvertures rappelant les vieux scaphandres en cuivre. L'apparence antique est trompeuse : il s'agit d'un bijou de technologie dernier cri fabriqué maison. « C'est un peu comme une balance normale, mais on compare d'un côté une masse [un kilogramme en l'occurrence] avec de l'autre un champ électromagnétique produit dans une bobine parcourue par un courant électrique », explique le scientifique.

En incluant dans les calculs certains effets quantiques, cette comparaison

entre puissances mécanique et électrique permet d'obtenir avec précision la valeur de la constante de Planck et de la fixer, c'est-à-dire de s'accorder sur une valeur qui réduira ensuite au maximum l'incertitude des mesures. « Le miracle, c'est qu'on a établi un lien entre les mondes microscopique et macroscopique. L'expérience est très sensible, notamment aux variations du champ gravitationnel. On a dû tenir compte de la position de la Lune et de l'influence de la colline à côté », explique Michael Stock.

Maintenant que ces « détails » sont réglés, la balance du BIPM peut servir à étalonner des kilogrammes physiques. Dans les prochaines semaines, elle sera mise à contribution en tant que point de référence pour neuf laboratoires d'autant de pays. « On calculera une sorte de moyenne des étalonnages et c'est ce qui servira de base. Quand on aura atteint le consensus, chaque pays pourra utiliser sa propre balance pour étalonner ses masses. » Car en pratique, les industries continuent de recourir à des étalons physiques et il faut donc calibrer des objets secondaires pour « disséminer » ensuite la bonne valeur. « La redéfinition n'a rien changé à l'instrumentation pratique et c'était le but. Mais pour "réaliser le kilogramme" au niveau primaire, désormais, il faut une balance de Kibble », résume Michael Stock. De fait, le kilo pèse toujours un kilo, mais il est stable.

Dans la foulée, en 2018, le kelvin, la mole et l'ampère ont eux aussi été revus. L'unité de température est maintenant liée à la constante de Boltzmann, qui fait le lien entre l'énergie des atomes d'un gaz et leur température. La mole (quantité de matière) est pour sa part reliée à la constante dite d'Avogadro et l'ampère à la charge de l'électron.

Cette révolution majeure a eu l'avantage de rendre les unités de base interdépendantes : toutes (sauf la mole) peuvent être exprimées à partir de la seconde. Ainsi, la fameuse constante de Planck s'écrit  $6,626\,070\,150 \times 10^{-34}$  kg.m<sup>2</sup>/s. « Avec ces nouvelles définitions, on peut mesurer d'autres grandeurs, par exemple en électricité ou en mécanique, en se reportant à des mesures de durée, qui sont d'une très haute exactitude », note Marc Himbert.

## MONDE CHIMIQUE

La petite fiole qu'Isabelle Rajotte tient dans sa main est un étalon, une référence sur laquelle d'autres laboratoires se baseront pour leurs mesures. Ce qu'elle contient ? Exactement 1 mg/ml de THC, substance active du cannabis. « Depuis quelques années, on fait beaucoup de mesures standards sur le cannabis en collaboration avec Santé Canada », explique la jeune chercheuse du CNRC en déambulant au milieu des spectromètres de masse. Le ministère avait en effet besoin de repères fiables en vue de la légalisation en 2018 et continue de vérifier les produits commerciaux. Car pour quantifier une molécule, il faut encore une fois que les divers laboratoires puissent se comparer avec une source fiable : c'est le principe de la métrologie chimique, qui a des applications fondamentales en sécurité alimentaire, agriculture, santé et médecine légale. « Il faut un étalon différent pour chaque molécule. Ça ne finit jamais ! Ici, nous avons des standards pour plus d'une centaine de molécules, dit-elle. Il s'agit souvent de substances nocives comme les toxines, les métaux lourds, les pesticides. »



## UN ÉTERNEL CHANTIER

Véritable pilier du SI, la seconde est le prochain gros chantier des métrologues et devrait repasser d'ici quelques années au moulinet de la redéfinition. Autrefois, elle était définie par la rotation de la Terre, qui n'est pas régulière. Elle repose aujourd'hui sur une propriété de l'atome de césium, qui « vibre » avec une fréquence si régulière qu'on peut se caler dessus pour égrener le temps. Les vibrations sont en réalité un changement de niveau d'énergie des électrons excités par des micro-ondes qui se produit très précisément 9 192 631 770 fois par seconde. À Ottawa, les gardiens du temps comptent ainsi sur six horloges atomiques commerciales et une « fontaine de césium », qui est un dispositif expérimental avec lequel on peut obtenir une fréquence extrêmement précise et stable et qui sert d'étalon primaire. En 100 millions d'années, ce type de compteur ne dériverait même pas d'une seconde. Dans le monde, il n'en existe qu'une dizaine – celui du CNRC est une sorte de réservoir vertical en inox, où « flottent » des atomes de césium refroidis, relié à un système de lasers. « Le temps est la quantité physique qu'on mesure avec le plus de précision », confirme Pierre Dubé, spécialiste du temps au CNRC.

Son équipe vise encore plus haut et essaie de mettre au point une horloge dite optique qui devrait être 100 fois plus précise. En excitant les atomes avec des lasers plutôt qu'avec des micro-ondes, on les fait osciller 100 000 fois plus vite et l'on gagne donc en précision. « Notre but est de piéger un seul ion de strontium dans le vide pour l'isoler des perturbations externes, puis de détecter la fluorescence qu'il émet selon son état quantique », détaille le chercheur dans une salle obscure où il peaufine son dispositif. Il indique que plusieurs autres horloges optiques sont en développement dans le monde, avec des atomes d'aluminium, d'ytterbium, de calcium, de mercure... Les jeux sont ouverts!

Cet objectif de précision paraît exagéré, mais « c'est parce qu'on a amélioré notre façon de mesurer le temps qu'on a pu concevoir le GPS par exemple », illustre Georgette Macdonald. Et nous aurons besoin d'encore plus de finesse pour nos

prochaines révolutions technologiques. À commencer par l'arrivée de l'ordinateur quantique. Au LNE-Cnam, Laurent Pitre, spécialiste de la métrologie thermique, travaille justement sur un « réfrigérateur à dilution ». Cette machine complexe qui occupe une pièce entière permet de mesurer des températures proches du zéro absolu, auxquelles se manifestent les phénomènes quantiques. « Il n'y a que trois laboratoires dans le monde qui servent de références pour des températures inférieures à 1 K. Ce n'est pas simple : de 0,07 K à 273 K [soit entre le voisinage du zéro absolu et 0 °C], il y a un facteur de 40 000, soit un même ordre de grandeur qu'entre nous et le cœur des étoiles », dit-il.

L'avenir de la métrologie se trouve dans ces extrêmes, assure Marc Himbert. « On travaille à étendre les méthodes de mesure pour qu'elles s'appliquent à des échelles plus larges, qu'on parle du quantique, des très hautes températures pour les procédés industriels ou des mesures dans les nano- et microsystèmes. »

À ce chapitre, le monde mouvant des molécules biologiques, plutôt effrayant pour les métrologues-physiciens, est le prochain territoire à défricher. C'est ce que veut entreprendre Martin J. T. Milton au BIPM. « La pandémie nous a rappelé à quel point les mesures en biologie et en biochimie sont importantes. Nous allons nous attaquer à cette grande question. Comment utiliser les unités de mesure pour quantifier les particules virales, l'activité biologique, le taux d'anticorps ? Pour avoir des tests diagnostiques in vitro comparables d'un pays à l'autre ? »

Le directeur souhaite également qu'encore plus de pays rejoignent les rangs de son organisation et participent à ses débats scientifiques, à la hauteur de leur savoir-faire et de leurs moyens. « En mai 2025, le BIPM fêtera ses 150 ans. Il nous faut revoir la vision d'universalité pour inclure plus de pays en développement, qui sont sous-représentés », plaide-t-il.

Au 19<sup>e</sup> siècle, la fondation du système métrique a été scellée par la création d'une médaille sur laquelle on a gravé : « À tous les temps, à tous les peuples. » Une *unité* dont on a plus besoin que jamais. ●



La balance de Kibble du BIPM, qui a servi à « réaliser » le kilogramme.



## LE DÉPARTEMENT DU TEMPS



Sur le toit d'un des bâtiments du BIPM, une dizaine de petites antennes circulaires se dressent vers le ciel. Elles sont les garantes de l'heure du monde : elles collectent des données satellites via une quinzaine de récepteurs, des boîtes rectangulaires reliées par un fouillis de câbles dans une petite salle ressemblant à un centre informatique.

C'est ici qu'est calculé le temps universel coordonné (UTC), en combinant les données d'environ 450 horloges de référence situées dans 85 laboratoires tout autour de la Terre. « Notre travail est surtout théorique ; on fait une sorte de moyenne de ces horloges. Même si elles sont très précises, il y a de petites fluctuations, parfois des anomalies,

donc il faut pouvoir les comparer », explique Patrizia Tavella, directrice du Département du temps au BIPM. Si l'on voyageait autrefois avec les horloges, on les compare désormais avec les systèmes de satellites conçus pour le positionnement.

Comme les satellites ont à leur bord des horloges atomiques synchronisées, l'idée est simple : « Le laboratoire de métrologie chinois voit le satellite GPS n° 22 et mesure la différence entre l'horloge de son laboratoire et l'horloge du satellite. Au même moment, le CNRC voit le même satellite et fait la même mesure ; on a donc une référence commune », illustre l'experte.

Seul hic : les calculs pour produire le « temps atomique international » sur la base de ces données sont longs à effectuer. « On donne à posteriori l'heure d'il y a un mois. Ce que le BIPM publie mensuellement, c'est la différence entre le temps international et le temps de chaque pays, obtenu le mois précédent en temps réel par les laboratoires nationaux. Si le Canada constate que son UTC a 35 nanosecondes de retard sur le temps atomique, il peut faire la correction pour le mois suivant. »

Le système est bien rodé, mais il est encore l'objet d'importants débats. « Dans les années 1960, on se disait que le temps civil, qui servait pour la navigation, devait tout de même rester lié à la rotation de la Terre. Or, le jour de la Terre est un peu plus

## LA LONGUE QUÊTE DE LA PRÉCISION

1790

Un décret visant à uniformiser les mesures est adopté juste après la Révolution française. On souhaite que le roi d'Angleterre appuie la démarche.

1791

Naissance du mètre (qui équivaut à la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre). Il faudra sept ans pour mesurer la longueur du méridien entre Dunkerque et Barcelone, par des opérations de triangulation.

1795

Un décret institue le système métrique décimal en France.

1799

Deux étalons en platine pour le kilogramme (un prédécesseur du grand K) et le mètre sont fabriqués.

1840

Le système métrique, qui peine à s'imposer, devient obligatoire en France.

1867

Un comité des poids et mesures et des monnaies voit le jour à l'Exposition universelle de Paris. Ce type de foire, qui met de l'avant les innovations techniques, joue un rôle crucial dans la diffusion du système métrique.

1875

Signature de la Convention du mètre par 17 nations et création du BIPM, qui doit conserver les prototypes et fabriquer les étalons nationaux autour de trois unités : le mètre, le kilogramme et la seconde.



long que la journée atomique. On a donc décidé de corriger légèrement le temps atomique international afin qu'il reste en accord avec la rotation de la Terre : c'est ce qui donne l'UTC», détaille Patrizia Tavella. À 27 reprises depuis 1972 (la dernière fois en 2016), il a donc fallu ajouter une seconde aux horloges atomiques : c'est ce qu'on appelle les secondes intercalaires.

Ces ajouts mettent un joyeux bazar dans les systèmes informatiques, qui ne sont pas conçus pour des minutes à 61 secondes. Résultat : le système GPS, né dans les années 1980, a décidé de ne pas ajouter de secondes intercalaires. «Les horloges GPS sont 18 secondes en avance par rapport à l'UTC; idem pour le système européen Galileo. Le système russe, lui, s'est synchronisé; le système chinois, né plus tard, a un décalage de 4 secondes. Il y a une confusion énorme! Et dans les systèmes de navigation, la synchronisation est cruciale. Une erreur de 10 nanosecondes, ça correspond à une erreur de trois mètres au sol... On aimerait supprimer ces secondes intercalaires et en discuter à la conférence de cette année», indique la chercheuse.

Si l'on découple la rotation de la Terre et l'heure atomique, les horloges finiront par dire qu'il est midi alors qu'il fait nuit sur Terre, dans des milliers d'années. Est-ce le prix à payer pour remettre les pendules à l'heure?



Dans un laboratoire du LNE-Cnam, une cellule de quartz remplie d'eau pure est utilisée pour étalonner les thermomètres grâce au point triple de l'eau.

## ÇA CHAUFFE !

Le laboratoire de thermométrie du LNE-Cnam, en banlieue de Paris, étalonne environ 1 000 thermomètres industriels ou de recherche chaque année, qui constitueront eux-mêmes des références pour d'autres thermomètres. Le processus repose sur des repères appelés «points fixes» qui servent de références pour des températures allant de 0 à 961,78 °C (oui, les degrés Celsius s'imposent dans les laboratoires de métrologie, même si les kelvins sont l'unité officielle!).

En pratique, il s'agit de bacs, fours, bains de glace où sont plongés des thermomètres. Les scientifiques se calent sur des propriétés physiques (point de fusion, de congélation...) de métaux les plus purs possibles et de l'eau. Ainsi, le point de fusion du gallium se situe à 29,7646 °C et le point de congélation de l'indium à 156,5985 °C. Mais c'est le «point triple de l'eau», une valeur unique à 273,16 K (0,01 °C) à laquelle l'eau existe simultanément dans ses phases solide, liquide et gazeuse, qui aide à définir l'unité de température kelvin. De longs tubes en quartz contenant de l'eau sous ces trois phases sont utilisés au laboratoire et parfois expédiés à l'étranger dans un souci d'homogénéisation internationale.

1935

Ajout de l'ampère pour les paramètres électriques et magnétiques.

1954

Ajout du kelvin et de la candela.

1960

Adoption du nom «système international d'unités». Le BIPM devient le garant de l'uniformité du système mondial de mesures.

1970

Le gouvernement canadien dépose un livre blanc sur la conversion du pays au système international d'unités.

1971

Ajout de la mole, unité de quantité de matière, en réponse à l'essor de la chimie.

2022

Les Canadiens achètent toujours leur viande hachée à la livre et connaissent leur taille en pieds et pouces...



Les sept unités de base du SI (kilogramme, mètre, seconde, ampère, kelvin, mole, candela) et les constantes dont elles dépendent.