

# LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE DU TEMPS INCONTOURNABLE DANS LA MISE EN PLACE DE LA FUTURE SECONDE

EN 2030, L'UNITÉ DE TEMPS CHANGERA DE DÉFINITION. PRINCIPAL CONTRIBUTEUR ACTUEL À L'ÉTALONNAGE DU TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL, LE LNE-SYRTE EST AUJOURD'HUI AUX AVANT-POSTES DES DÉVELOPPEMENTS NÉCESSAIRES À CE CHANGEMENT. SES PROJETS DE RECHERCHE ACTUELS EN SONT L'ILLUSTRATION.



BANC OPTIQUE (REFROIDISSEMENT ET DÉTECTION PAR LASERS)  
DE L'HORLOGE OPTIQUE À ATOMES NEUTRES DE MERCURE.

## «IL EXISTE ACTUELLEMENT UNE DIZAINE DE TRANSITIONS PROMETTEUSES.»

**SÉBASTIEN BIZE,**  
DIRECTEUR DU LNE-SYRTE

Cette fois ça y est, la redéfinition de l'unité de temps est en route. La dernière Conférence générale des poids et mesures (CGPM), en novembre dernier, a adopté une feuille de route avec des jalons et des critères pour l'adoption effective de la nouvelle définition de la seconde en 2030. Depuis 1967, la définition de cette dernière est liée à la fréquence d'une transition micro-onde de l'atome de césium. Elle sera remplacée par une définition fondée très probablement sur une ou plusieurs transitions atomiques dans le domaine des radiations optiques de fréquence beaucoup plus élevée. À la clé, la possibilité de réaliser l'unité de temps avec une exactitude 100 fois meilleure. Mais, pour que cette «seconde optique» devienne une réalité, elle doit être étayée par la mise en place d'une infrastructure, sur tous les continents, permettant d'assurer sa robustesse, sa pérennité et sa dissémination, et cela implique des développements tant sur les références de fréquence, que sur les échelles de temps international, ou sur leurs moyens de comparaison, locaux ou à distance intercontinentale. Dans cette tâche, le LNE-SYRTE, qui contribue à lui seul pour 40 % de l'étalonnage primaire du Temps Atomique International (TAI) au niveau mondial, est sur tous les fronts.

### TROIS OPTIONS POUR LA FUTURE DÉFINITION

La feuille de route adoptée repose sur des travaux antérieurs du Comité international des poids et mesures (CIPM), précisément de son Comité consultatif du temps et des fréquences, le CCTF, qui ont conduit à la proposition, en 2022, de trois options possibles pour formuler la nouvelle définition : une, la plus naturelle dans le contexte de la révision générale du SI en 2018, serait de prendre comme base de définition une constante fondamentale de la physique, mais cette option nécessiterait une vingtaine d'années de travaux préalables pour être validée. Les deux autres options sont davantage dans la continuité de la définition actuelle, fondées sur une ou plusieurs transitions atomiques.

### UNE EXACTITUDE PROCHE DE 10<sup>-18</sup>

Ainsi, concrètement, le laboratoire national de métrologie français a déjà mis au point depuis plusieurs années deux horloges optiques fondées sur une transition du strontium, et une autre utilisant le mercure. Aux limites de précision permises par la mécanique quantique, les deux premières atteindront bientôt une exactitude proche de 10<sup>-18</sup>. La troisième (mercure) est intéressante car, moins sensible au rayonnement thermique, est exploitée pour explorer et quantifier expérimentalement des effets systématiques liés à des phénomènes quantiques et donc les limites ultimes de ces horloges optiques. Enfin, le laboratoire développe actuellement une horloge optique transportable fondée sur une transition de l'ytterbium ; horloge qui a déjà été utilisée en 2022 comme étalon voyageur pour comparer des horloges optiques très éloignées.

«Il existe actuellement une dizaine de transitions prometteuses», commente Sébastien Bize, directeur du LNE-SYRTE. Raison pour laquelle la CGPM a décidé que l'«option préférée» pour la future définition devait être retenue en 2026. La première possibilité, d'apparence simple, serait de fonder la nouvelle seconde sur une unique transition. Dans un contexte où plusieurs choix sont possibles, une autre solution serait de définir intrinsèquement l'unité de temps à partir d'un ensemble de transitions assorties d'une pondération à définir. Un chercheur du laboratoire a en effet montré récemment qu'une telle définition présenterait toutes les propriétés requises. Comme le note Noël Dimarcq,

président du Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), «on peut même imaginer que les transitions retenues et la pondération de chacune d'elles dans la nouvelle définition soient fixées au moment de la redéfinition ou qu'elles puissent évoluer au gré des progrès.»

### STABILITÉ ET PÉRENNITÉ EN LIGNE DE MIRE

Au-delà de cette question de définition, les métrologues s'affairent désormais pour que tout fonctionne parfaitement le jour de la «basculer». Dans ce but, il faudra être capable d'interroger les atomes avec des radiations optiques très fines et stables sur de longues durées. Pour ce faire, le laboratoire, dans le cadre du projet SYNTHOMA, développe un laser femtoseconde stabilisé sur cavité à la pureté spectrale et à la stabilité extrêmes. Il devrait amener les horloges au strontium et au mercure du laboratoire à une stabilité de 10<sup>-16</sup> sur une seconde. À plus long terme, la stabilisation des lasers d'interrogation sur des ions de terres rares enchâssés dans une matrice cristalline cryogénique, ce à quoi vise le projet LUSTROM, devrait même porter cette stabilité autour de 10<sup>-17</sup>. «Nous mettons l'accent sur les aspects opérationnels, avec pour objectif la possibilité d'exploiter les horloges 24 heures sur 24», résume Sébastien Bize.

Interroger les atomes, mais également comparer les horloges optiques entre elles, ce qui est une condition nécessaire au déploiement de la seconde optique.

À cette fin, le LNE-SYRTE a mis en place dès 2017 la station automatique de

### L'HORLOGE PARLANTE S'EST TUE

Installée à l'Observatoire de Paris depuis 1933 et mise en œuvre par le LNE-SYRTE, l'horloge parlante fournissait le temps légal en référence à UTC(OP). Mais, après presque 90 ans de fonctionnement ininterrompu, elle s'est arrêtée le 1er juillet dernier sur décision d'Orange, qui en était responsable depuis 1991. En remplacement, le LNE-SYRTE a mis en place une page internet, <https://heurelegalefrancaise.fr>, qui permet d'afficher l'heure légale française générée à partir des serveurs NTP du laboratoire.

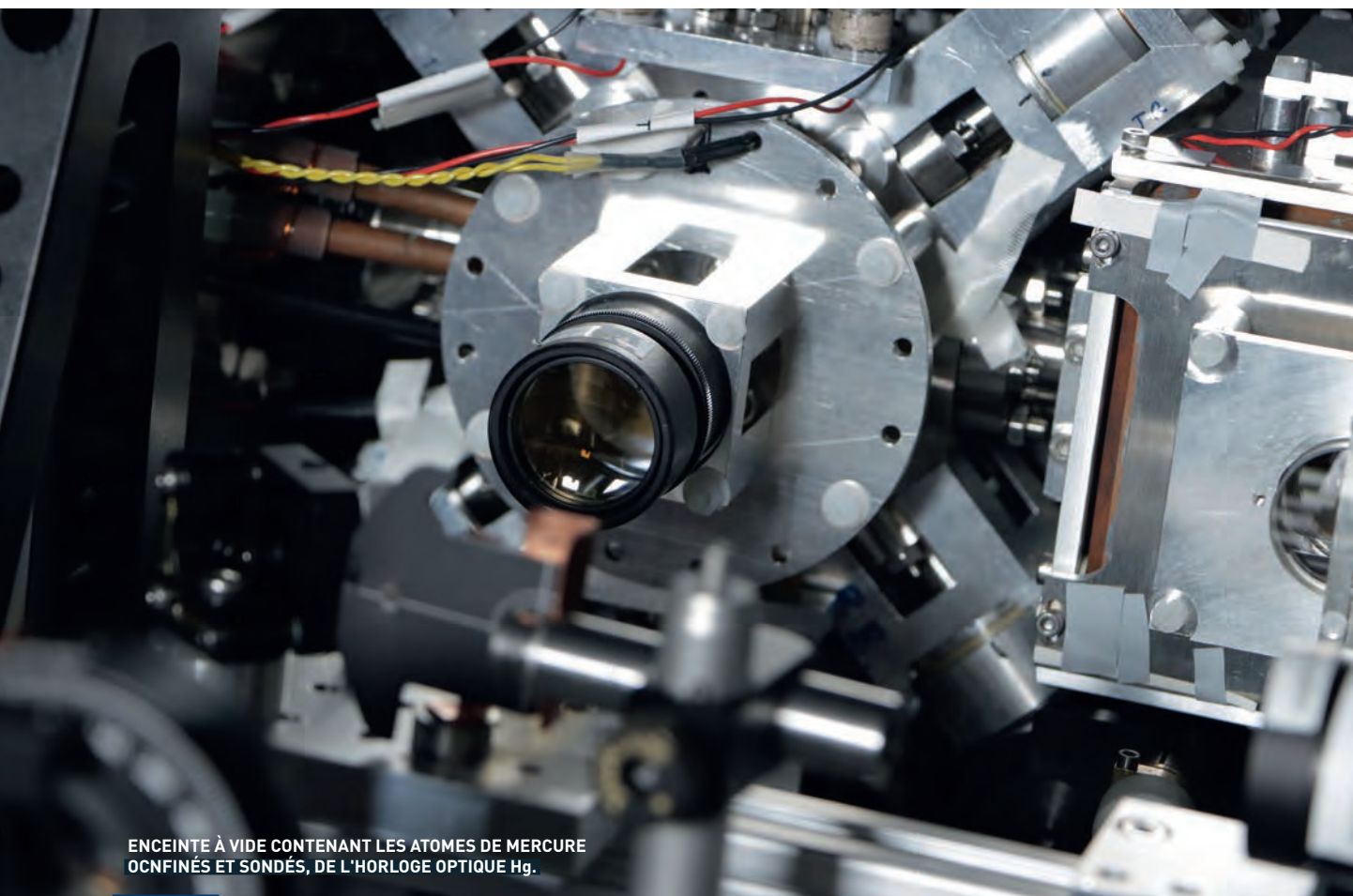
mesure et de comparaison des références optiques, SAMIROF. «SAMIROF inclut également la connexion par réseau fibré de nos horloges à celles d'autres laboratoires en France, pour la dissémination des références de fréquence en différents points du territoire, et dans différents pays de l'Union européenne, notamment l'Allemagne (PTB), l'Italie (INRIM) et le Royaume-Uni (NPL), avec lesquels nous organisons régulièrement des comparaisons internationales», ajoute le physicien. Le réseau fibré français Refimeve qui permet ces comparaisons est piloté par le LPL qui est le partenaire clé du laboratoire de métrologie en la matière. Ce réseau très mature est labellisé comme infrastructure de recherche. Par ailleurs, des expériences de comparaison avec des horloges transportables ont également été menées avec le PTB, et une autre est en préparation avec la venue en Europe d'une horloge optique transportable japonaise. «À terme, des comparaisons routinières d'horloges seront indispensables pour garantir leur robustesse dans la durée», insiste le spécialiste.

### DES HORLOGES OPTIQUES POUR ÉTALONNER LE TAI

Si le LNE-SYRTE renforce ses moyens de comparaison et de transfert par fibre optique, dans le cadre notamment du projet TORTUE et grâce à l'infrastructure nationale Refimeve, en cours d'extension européenne, en parallèle, le laboratoire continue d'améliorer ses moyens de comparaison intercontinentale par satellite. Ces liaisons satellitaires sont de fait aujourd'hui mises en œuvre quotidiennement à la fois pour comparer des horloges micro-ondes, mais également pour contribuer au TAI. Ainsi, ces dernières années, les métrologues ont équipé leur station TWSTFT (transfert bidirectionnel de données par satellites) d'une plateforme radio-logicielle (SDR) qui ouvre la voie à une numérisation des liaisons entre horloges, gage d'une réduction de l'incertitude de comparaison. «L'objectif est de faire progresser ces liaisons intercontinentales pour se rapprocher d'incertitude de comparaison de  $10^{-17}$ », explique Sébastien Bize. En collaboration avec le LNE-LTFB, second

laboratoire national de métrologie temps-fréquence, localisé à Besançon, en charge du raccordement des instruments de mesure en France, des mesures de temps de vol et de transfert bidirectionnel ont été réalisées l'année dernière avec cette méthode SDR. Et dans le cadre du projet AMuGeM, le LNE-SYRTE poursuit l'amélioration de ses systèmes GNSS utilisés pour comparer et diffuser des références micro-ondes aussi bien avec les satellites des constellations GPS (américaine) que Galileo (européenne).

Enfin, afin d'adopter exclusivement la nouvelle définition de la seconde, il convient de s'assurer de la faisabilité de l'étalonnage du TAI avec des horloges optiques. C'est pourquoi, dès 2017, le LNE-SYRTE a ainsi été le premier laboratoire à connecter une de ses horloges au strontium au réseau mondial micro-onde et au TAI. Et en 2022, deux étalonnages du TAI ont encore été réalisés. De quoi faire du réseau français de métrologie du temps un acteur clé pour réussir la mise en place de la future définition de la seconde.



ENCEINTE À VIDE CONTENANT LES ATOMES DE MERCURE OCNFINÉS ET SONDÉS, DE L'HORLOGE OPTIQUE Hg.