

MÉTROLOGIE FONDAMENTALE

CONCEVOIR ET AMÉLIORER LES ÉTALONS NATIONAUX DE MESURE, DISSÉMINER LES RÉFÉRENCES VERS LES UTILISATEURS AVEC LES MEILLEURES INCERTITUDES, LES INNOVATIONS ET PROGRÈS EN MÉTROLOGIE FONDAMENTALE SOUTIENNENT LES DÉVELOPPEMENTS DE L'ENSEMBLE DES ACTIVITÉS HUMAINES.

LA COMPARAISON D'HORLOGES À L'HEURE NUMÉRIQUE



STATION TWSTFT DU LNE-SYRTE COMPORTANT LES ANTENNES ET LE BANC DE MESURE (MODEM ET PLATEFORME SDR) AINSI QUE LE SATELLITE ASSOCIÉ.

L'établissement du TAI (Temps atomique international) et de UTC (Temps universel coordonné) est fondé sur des comparaisons entre horloges atomiques distantes via des liaisons satellitaires. Dans le cadre d'un projet de la Métrologie française finalisé l'année dernière, les métrologues du LNE-SYRTE ont équipé la station TWSTFT du laboratoire (transfert bidirectionnel de données par satellite) d'une plateforme radio-logicielle (SDR). Celle-ci ouvre la voie à une numérisation des liaisons entre horloges, gage d'une réduction de l'incertitude de comparaison.

Jusqu'à alors, les signaux reçus par la station étaient entièrement traités analogiquement. À l'inverse, ils sont désormais échantillonnés au cours de leur démodulation, avant traitement à très haute vitesse par un réseau de portes logiques programmables (FPGA).

À la clé, la possibilité de comparer les signaux d'horloges de vingt stations simultanément, contre seulement deux auparavant. En outre, ce processus de numérisation s'accompagne d'une réduction du bruit expérimental permettant de réduire

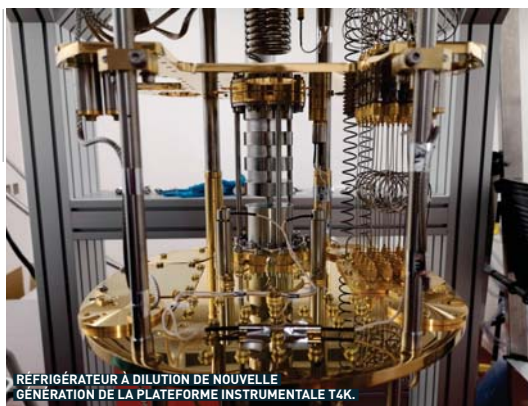
l'instabilité du lien satellitaire à mieux que 10^{-16} en moins de 10 jours.

Comme l'explique Joseph Achkar, responsable du projet, « nous avons également développé un récepteur SDR "voyageur" grâce auquel nous avons réduit l'incertitude d'étalonnage du lien satellitaire entre le LNE-SYRTE et l'institut national de métrologie allemand (PTB) à la valeur record de 0,5 ns, contre 1 ns auparavant ». Ce lien TWSDR, utilisé pour la première fois par le BIPM pour le calcul de UTC, préfigure l'évolution du réseau satellitaire permettant d'atteindre une précision compatible avec la future définition de la seconde.

👤 **JOSEPH ACHKAR** a été récemment nommé président du Groupe de travail «Émissions de fréquence étalon et de signaux horaires» de l'UIT (Union internationale des télécommunications) et président du Comité technique Temps-Fréquence d'EURAMET.



T4K, LA TRAÇABILITÉ DES MESURES DE TEMPÉRATURE ASSURÉE JUSQU'À 10 mK



RÉFRIGÉRATEUR À DILUTION DE NOUVELLE GÉNÉRATION DE LA PLATEFORME INSTRUMENTALE T4K.

La traçabilité des mesures de température entre 10 mK et 4 K, est un enjeu pour le développement des technologies quantiques et la caractérisation de détecteurs utilisés en astrophysique. Afin de réaliser les étalons français de thermométrie et de permettre l'étalonnage, au meilleur niveau d'incertitude, de thermomètres dans cette gamme de température, le LNE-LCM/Cnam, grâce à l'investissement financé à 65 % par la Région Ile-de-France (SESAME IdF, projet EX039201), a déployé l'année passée la plateforme instrumentale nommée T4K.

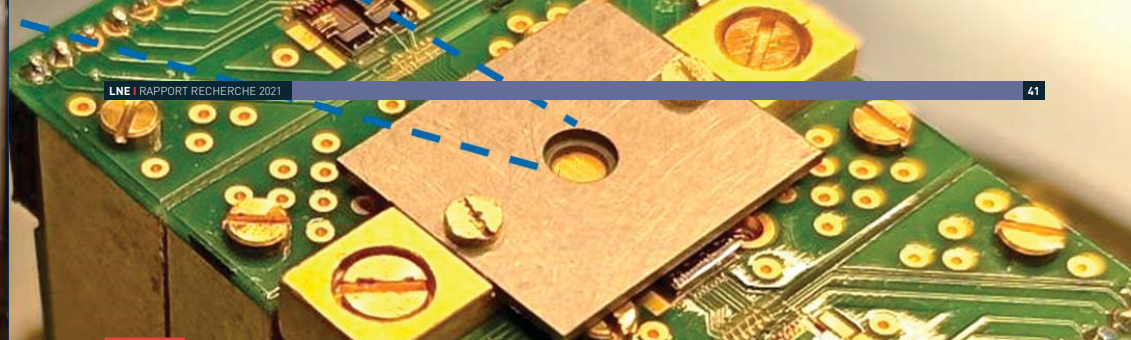
«Fondée sur un réfrigérateur à dilution de nouvelle génération, cette nouvelle infrastructure permettra d'atteindre 10 mK contre 50 mK actuellement», détaille Fernando Sparasci, spécialiste des mesures de température au LNE-LCM. «En outre sa grande stabilité en température nous place désormais parmi les rares laboratoires capables de garantir des mesures traçables à mieux que 0,5 mK, pour les températures inférieures à 4 K, spécifiques de l'environnement quantique.»

Précisément, dans un premier temps, T4K offrira la possibilité de réaliser avec une précision accrue l'échelle de température

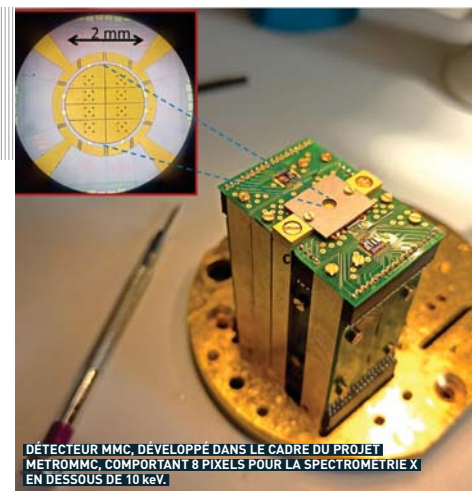
EPBT-2000 qui définit les références métrologiques de température entre 0,9 mK et 1 K, en relation avec la courbe de fusion de l'hélium-3. À terme, la plateforme intègrera les thermomètres à second son permettant de mettre en pratique à très basse température la nouvelle définition du kelvin adoptée en 2019 et fondée sur la constante de Boltzmann.

Actuellement en phase de tests, la plateforme T4K sera opérationnelle dès le second semestre de cette année. Elle fera du LNE-LCM un partenaire incontournable pour l'ensemble des recherches de pointe où la traçabilité des mesures de température est un enjeu crucial, notamment aux températures cryogéniques où les phénomènes quantiques sont accessibles.

Équipement financé à 65 % par la Région Ile-de-France (SESAME IdF, projet EX039201).



RADIONUCLÉIDES: LEUR DÉSINTÉGRATION PASSÉE AU PEIGNE FIN



DÉTECTEUR MMC, DÉVELOPPÉ DANS LE CADRE DU PROJET METROMMC, COMPORTANT 8 PIXELS POUR LA SPECTROMÉTRIE X EN DESSOUS DE 10 keV.

La connaissance précise des données de désintégration des radionucléides est cruciale aussi bien en médecine nucléaire que dans le domaine de la radioprotection. Afin de l'améliorer, le LNE-LNHB a participé au projet européen MetroMMC sur le développement et l'exploitation de calorimètres métalliques magnétiques (MMC). Il s'est achevé en 2021. Lors d'une désintégration radioactive, un MMC détecte l'énergie d'une particule via l'élévation de température qu'elle engendre lors de son interaction dans l'absorbeur. Ces détecteurs sont ainsi sensibles à tout type de rayonnement ionisant. Les MMC ont une bonne résolution en énergie et leur seuil de déclenchement est bas.

Ainsi, ces calorimètres permettent de mesurer la totalité de l'énergie associée à une désintégration radioactive, information à partir de laquelle on détermine d'autres données associées. Pour certains radionucléides, les rapports de

branchement, c'est-à-dire la probabilité que cette désintégration emprunte telle ou telle voie, peuvent être établies. Or ces informations sont cruciales pour exploiter les résultats de mesure obtenus par d'autres moyens en dehors des laboratoires de métrologie.

Dans le cadre de MetroMMC et d'autres projets menés en parallèle, les chercheurs français ont étudié la désintégration d'une dizaine de radionucléides. Comme le précise Matias Rodrigues, chercheur au LNE-LNHB, «jusqu'à présent, la plupart des rapports de branchement ainsi que d'autres données associées n'étaient déterminés que par calcul. Nos mesures permettent d'une part de les confirmer ou de les affiner, d'autre part de valider des modèles théoriques utilisés pour déterminer les paramètres des radionucléides qui ne peuvent être mesurés.» De quoi raffiner la totalité de la chaîne métrologique relative à la mesure des désintégrations radioactives.

TECHNOLOGIES QUANTIQUES

LE LNE, UN ACTEUR-CLÉ DANS LE DÉPLOIEMENT DE LA STRATÉGIE NATIONALE QUANTIQUE

Le 21 janvier 2021, le Président de la République Emmanuel Macron a présenté la Stratégie nationale sur les technologies quantiques (SNQ), dont l'objectif est de mettre sur pied l'écosystème capable de propulser la France dans le peloton de tête des nations qui maîtrisent ces technologies. Un plan dont le LNE est appelé à être un acteur clé.

Il faut dire que le laboratoire de métrologie est déjà bien présent au sein de réseaux qui visent à fédérer les efforts de recherche et de développement sur les technologies quantiques. Ainsi, le LNE est membre du Centre en sciences et technologies quantiques de l'Université Paris-Saclay (QUANTUM) et, avec d'autres laboratoires du RNMf, il participe aux Réseaux franciliens pour les technologies quantiques (SIRTEQ et QuantIP qui lui fait suite), de même que. Sur ces thématiques, le LNE a du reste noué depuis de nombreuses années des collaborations en particulier avec les équipes du CEA et du CNRS, notamment le Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N).

Dans le cadre de cette SNQ, le LNE aura notamment pour tâche le déploiement d'une plateforme de métrologie quantique au sein du RNMf. Comme l'explique Félicien Schopfer, au LNE, « il s'agit de tirer parti des progrès apportés par les technologies quantiques pour la nouvelle génération d'étalons quantiques, et réciproquement d'apporter des réponses aux besoins de mesure pour le développement de ces technologies. » Dans ce but, le LNE s'est de plus vu confier la coordination du Programme de développement de référentiels de mesure, de standards et de l'évaluation des technologies quantiques, un volet crucial de la SNQ pour les industriels.



LE LNE SUR TOUS LES FRONTS EUROPÉENS DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES



L'essor des technologies quantiques à l'échelle européenne repose en partie sur la capacité de la communauté des métrologues à analyser les besoins et mettre en place des stratégies coordonnées entre les différents acteurs concernés à l'échelle du continent. C'est dans ce but qu'EURAMET a créé en 2019 le Réseau Européen de Métrologie, EMN – European Metrology Network, pour les activités dans le domaine des technologies quantiques, l'EMN-Q. Ainsi, l'année passée, l'EMN-Q a élaboré la première version de son Plan de recherche stratégique.

« Les technologies quantiques ont besoin de métrologie, et la métrologie est impliquée de longue date dans leur développement, explique Sébastien Bize du LNE-SYRTE et vice-président pour la thématique Quantum clocks & Atomic sensors de l'EMN-Q, qui ajoute : l'univers de la métrologie joue également le rôle d'interface avec les problématiques de normalisation ». D'où la place centrale du RNMf au sein de l'EMN-Q avec deux de ses membres siégeant au comité de pilotage, notamment du fait du travail pionnier du LNE-SYRTE, depuis de nombreuses années, dans le domaine temps-fréquence et sur les capteurs inertiels et gravimétriques. Mais aussi grâce aux nombreux dévelop-

pements réalisés au LNE sur les étalons quantiques en métrologie électrique ou au LNE-LCM/Cnam pour la caractérisation de capteurs de photons uniques.

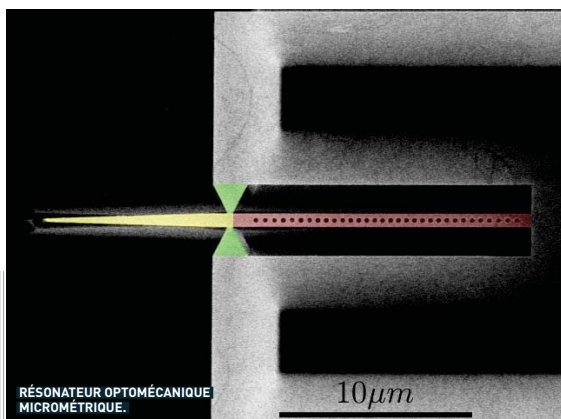
Par ailleurs, le LNE a rejoint en 2021 le *Focus Group on Quantum Technology* (FGQT) mis en place par le comité de normalisation CEN-CENELEC, afin d'aider à identifier les besoins en normalisation spécifiquement sur les technologies quantiques, et in fine soutenir leur le déploiement industriel de ces nouvelles techniques.

Enfin, le laboratoire français est membre associé depuis juin dernier du Consortium européen de l'industrie quantique (QuIC). Avec ses partenaires industriels, il participe ainsi activement à plusieurs groupes de travail sur la normalisation et l'élaboration de feuilles de route industrielles.

La plupart de ces travaux sont menés en lien fort avec l'initiative de recherche et d'innovation programmée en Europe à grande échelle sur les technologies quantiques, le *Quantum Flagship*. Engagé à partir de 2018 pour une durée de 10 ans, ce programme bénéficie d'un plan de financement de 1 Md€ par la Commission européenne, une initiative structurante s'il en est sur le sujet des technologies quantiques !

TECHNOLOGIES QUANTIQUES

MESURE DE TEMPÉRATURE : LA PRÉCISION QUANTIQUE À PORTÉE DE MAIN



La miniaturisation croissante des composants électroniques, photoniques et optoélectroniques nécessite le développement de sondes locales de température présentant des résolutions spatiales inférieures au micromètre. C'était l'enjeu du projet européen PhotOQuanT, coordonné par le LNE-LCM/Cnam, qui s'est achevé en 2021. Dans ce cadre, les métrologues français et leurs collaborateurs ont mis au point un capteur optomécanique de température qui, à terme, sera un capteur quantique de mesure de température thermodynamique.

Précisément, ce capteur prend la forme d'un résonateur optomécanique micrométrique dont la température est déterminée à partir du bruit thermique (quantique) accessible par la mesure de la modulation de phase d'un laser sonde créée par les vibrations thermiques couplées à des excitations optiques du résonateur. «Dans le cadre de PhotO-

QuanT, partant de zéro, nous sommes ainsi parvenus à réaliser des mesures de température avec notre capteur, ce qui constitue 80 % de l'objectif», explique Stephan Briaudeau, chercheur et responsable du projet au LNE-LCM/Cnam.

Pour le mener à son terme, les physiciens s'attendent désormais à lier de manière irréductible les excitations optomécaniques du résonateur aux photons du laser sonde. L'intérêt : la mécanique quantique indique que la température du résonateur est alors directement fonction de la corrélation quantique créée entre les fluctuations de phase et d'amplitude du laser sonde. Ce faisant, les spécialistes français disposeront d'un thermomètre intrinsèquement thermodynamique, rejoignant leurs collègues du Laboratoire national de métrologie américain, le NIST, aujourd'hui les seuls à maîtriser les mesures de température en régime quantique à partir d'un capteur optomécanique.

LE GRAPHÈNE : UN MATÉRIAU ESSENTIEL POUR LA MÉTROLOGIE ÉLECTRIQUE ET PROMETTEUR POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES



Le graphène constitue aujourd'hui un matériau de choix pour réaliser des étalons quantiques de résistance électrique tout comme pour explorer certaines technologies quantiques. Dans le cadre d'un projet européen du programme EMPIR achevé l'année dernière, auquel ont participé trois laboratoires de métrologie européens et deux laboratoires de recherche français (CEA et CNRS), les chercheurs du LNE ont pu étudier des échantillons de graphène de très haute mobilité électronique.

Globalement, le projet SEQUOIA visait à explorer la faisabilité de capteurs électromagnétiques ultra-rapides, de très grande sensibilité, fondés sur l'interférométrie à un électron. De leur côté, les métrologues français ont eu l'opportunité d'étudier la quantification de l'effet Hall dans deux échantillons de graphène encapsulé entre deux couches de nitrure de bore, dans le but de réaliser des étalons quantiques de résistance fonctionnant avec

un champ magnétique moins intense que celui auquel ils sont soumis actuellement.

Les mesures ont permis de comprendre l'impact sur les propriétés de dissipation et de quantification de Hall non seulement de la mobilité électronique mais également de certaines spécificités de ces échantillons (taille, présence d'une grille électrostatique en graphite à quelques dizaines de nanomètres du graphène). De plus, dans la perspective du développement de nouvelles technologies quantiques, les chercheurs se sont intéressés à la rupture de l'effet Hall quantique, phénomène dont ils ont estimé le potentiel pour la détection rapide d'électrons.

Comme l'explique Wilfrid Poirier, responsable du projet au LNE, «au-delà des résultats obtenus, ce projet, dont nous avons organisé la réunion de clôture, a été une très belle occasion d'élargir les collaborations entre les communautés de métrologie électrique et de recherche sur les technologies quantiques.»