



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

LABORATOIRE
NATIONAL
DE MÉTROLOGIE
ET D'ESSAIS



RAPPORT RECHERCHE
2024

EDITORIAL



« RÉPONDRE AUX DÉFIS ET AUX ENJEUX DE NOS SOCIÉTÉS »

THOMAS GRENON, DIRECTEUR GÉNÉRAL

technologies du numérique et de l'intelligence artificielle. Sur ce thème, le LNE a inauguré en mai 2024 sa plateforme LE.IA Immersion d'évaluation de l'intelligence artificielle qui offre un environnement virtuel pour tester les capacités d'asservissement et de prise de décision des systèmes IA dans des conditions réalistes. S'agissant des technologies quantiques, il faut souligner la poursuite du programme MetriQs-France, coordonné par le LNE dans le cadre du Plan national quantique. Et l'on peut saluer le démarrage d'un nouveau projet sur « *La métrologie des composants pour les calculateurs quantiques* » qui doit développer des méthodes de mesure de référence pour la caractérisation des composants et des signaux de contrôle des processeurs quantiques à l'état solide.

Ces projets illustrent que la métrologie est une des clés de la compétitivité économique et industrielle, mais aussi de la transition énergétique et de la sécurité de nos sociétés et, ce faisant, de leur souveraineté. Le rappeler est le sens du Livre blanc publié par EURAMET en 2024 dans le cadre de la préparation du prochain programme-cadre de financement de la recherche et de l'innovation de l'Union européenne, le FP10. Cette publication, à laquelle le LNE a largement contribué, met en avant quatre grands domaines : « Industrie compétitive et souveraine », « Transition vers une Europe durable et résiliente », « Santé » et « Infrastructures et cohésion ». Il plaide pour une coopération renforcée des instituts nationaux de métrologie, de l'industrie et des organismes de normalisation, à l'échelle du continent européen. C'est la condition pour garantir une métrologie européenne robuste et alignée sur les besoins futurs.

S'il était encore à démontrer, le rôle crucial de la métrologie a été l'année dernière symboliquement souligné par l'UNESCO qui a officiellement proclamé le 20 mai comme Journée mondiale de la métrologie. À cette occasion, Maguelonne Chambon, directrice de la recherche au LNE, a donné une conférence au siège de l'organisation sur le thème « Métrologie et développement durable : la vision d'un laboratoire ». La métrologie est au cœur de nos vies. En cette année 2025 du 150^e anniversaire de la signature de la Convention du mètre, le LNE aura à cœur de le rappeler au travers d'une série de manifestations ouvertes au public !

Le 20 mai 2025, la communauté métrologique mondiale fêtera le 150^e anniversaire de la signature de la Convention du mètre qui est aux fondements du Système international d'unités, le SI. La France a joué un rôle majeur dans la mise en place de cette infrastructure indispensable aux échanges et au progrès technique. Elle est aussi aux avant-postes de ses évolutions continues qui permettent de répondre aux défis et aux enjeux de nos sociétés. L'année écoulée au sein du LNE et du Réseau national de la métrologie française (RNMF) l'illustre à bien des égards.

Au niveau le plus fondamental, le LNE-SYRTE est un acteur majeur pour la redéfinition en cours de la seconde. Tout au long de l'année, il a en particulier joué un rôle actif pour définir les contours de la feuille de route qui sera présentée à la CGPM de 2026, qui devrait adopter l'option préférée pour la nouvelle définition. La légitimité du laboratoire dans cette tâche s'appuie sur ses nombreux travaux sur les horloges optiques au strontium et au mercure, ainsi que sur son rôle prépondérant dans le développement d'un réseau fibré européen pour la dissémination de l'unité de temps et les comparaisons d'horloges.

Au-delà des actions de métrologie fondamentales, le LNE et ses partenaires du RNMF sont incontournables pour assurer l'essor et l'encadrement des technologies qui révolutionnent actuellement nos usages. Il s'agit en premier lieu des

SOMMAIRE

• Éditorial	3
• Carte d'identité du LNE et du Réseau national de la métrologie française (RNMF)	6
• La recherche en métrologie et essais : un gage de pertinence et d'efficacité des normes	8
• DOSSIER : Kilogramme, sa dématérialisation en phase active	10
• Le LNE, double invité d'honneur de l'académie des technologies	13
• Laboratoire de métrologie dimensionnelle : le mètre dans tous ses états	14
• Prix LNE de la Recherche 2024 : pleins feux sur la métrologie des rayonnements !	16
• 150 ^e anniversaire de la signature de la Convention du mètre : le LNE à la fête !	18
• Fête de la Science 2024 : cinq films pour sensibiliser à la surveillance et à la protection des océans	19



COMPÉTITIVITÉ INDUSTRIELLE

• Mesures électriques : le nanomonde accède à la précision métrologique	21
• Robots industriels : leur position déterminée à 10 micromètres près	23
• Les états de surface désormais traçables au SI	23
• Robots à base d'IA : un référentiel pour accroître leur acceptabilité sociale	24
• Véhicule autonome : en route vers l'homologation !	25
• Télécommunications : prêt à mesurer l'intégrité du signal RF dans les systèmes électroniques	26
• Comparaison d'horloges par satellite à l'heure numérique : la stabilité améliorée	26
• Humidité des gaz ultra-purs : elle est désormais suivie à la trace !	27



TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

• Déchets électroniques, une métrologie décisive pour leur recyclage	29
• La métrologie met l'oxygène sous haute pression	29



SANTÉ ET SÉCURITÉ DES CITOYENS

- Gaz radioactifs : un matériau poreux pour les suivre à la trace 31
- Microfluidique : la métrologie au service de son unification 33
- Dosimétrie de l'environnement : les faibles doses de mieux en mieux tracées 33



MÉTROLOGIE FONDAMENTALE

- La seconde optique en voie de stabilisation 35
- Isotope bosonique du mercure : un gage de stabilité pour la seconde optique 37
- Étalon quantique de courant électrique : une incertitude record ! 38
- Étalon calculable de capacité : ses performances démontrées 39
- Kelvin : des références de température thermodynamique de plus en plus chaudes 40
- Désintégrations bêta : les transitions interdites sous l'œil des métrologues 41

THÈSES DE DOCTORAT SOUTENUES EN 2024 42

CARTE D'IDENTITÉ

La montée exponentielle des nouvelles technologies et de leur utilisation au quotidien, la poursuite des politiques de développement durable et de santé publique, aussi bien au niveau européen que national, requièrent encore et toujours de plus en plus de mesures fiables, incontestables, sur lesquelles il est possible de se reposer pour prendre des décisions, à quelque niveau que ce soit. Gestion de la pollution et de la transition énergétique pour une réduction majeure des gaz à effet de serre, suivi de l'évolution du climat, santé et biologie, technologies quantiques, industrie du futur, modélisation et numérisation, intelligence artificielle, contact alimentaire, nouveaux matériaux, constituent autant de thématiques de recherche sur lesquelles se penche la Recherche du LNE.

Pilote de la Métrologie française, le LNE coordonne les recherches du Réseau national de la métrologie française (RNMf) structuré autour de 10 laboratoires de métrologie. Ces laboratoires sont officiellement désignés auprès des instances européennes et internationales sur un ou plusieurs domaines spécifiques. De la mise en pratique des unités du Système international d'unités (SI) jusqu'au développement de bancs d'étalonnage, ces laboratoires ont pour missions de réaliser et d'améliorer les références nationales de métrologie, de participer aux comparaisons internationales des étalons nationaux ainsi que de disséminer ces références aux utilisateurs de mesures dans des secteurs très diversifiés.



LA RECHERCHE AU LNE EN 2024

25 %
du budget global du LNE

130
docteurs et ingénieurs

21
doctorants

89
publications dans des revues
à comité de lecture

Un portefeuille
de **15** brevets

LA RECHERCHE DU RNMF EN 2024

Plus de **290** scientifiques

150
projets de recherche
dont **68** JRP
(EURAMET Joint Research Projects)

148
publications dans des revues
à comité de lecture

+ de **230** communications
présentées lors de conférences

60
thèses de doctorat en préparation
dont **18** soutenues et **1** HDR obtenue

LES LABORATOIRES DU RÉSEAU NATIONAL DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE (RNMF)

LNE & LNE-CNAM : LCM

Le laboratoire commun de métrologie (LCM) entre le LNE, à Paris et à Trappes, et le Conservatoire national des arts et métiers (Cnam), à La Plaine-Saint-Denis, intervient pour la métrologie des longueurs, des grandeurs dimensionnelles, des températures et grandeurs thermiques, des masses et grandeurs apparentées (pression, force, couple, acoustique, accélération, viscosité...) et pour la radiométrie et photométrie.

LNE

Le LNE, à Paris et Trappes, est en charge de la métrologie relative à l'électricité et au magnétisme, à la chimie et biologie et aux outils mathématiques et statistiques, en sus des activités menées dans le cadre du LCM.

LNE-LNHB

Le Laboratoire national Henri Becquerel du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), à Saclay, est chargé de la réalisation des références métrologiques dans le domaine des rayonnements ionisants, la métrologie de la dosimétrie (MD) et de la radioactivité.

LNE-SYRTE

Le laboratoire des Systèmes de Référence Temps-Espace, sur le site de l'Observatoire de Paris - PSL, est responsable des références nationales de temps, de fréquence et de gravimétrie.
En 2025, le LNE-SYRTE devient le LNE-OP, au sein du Laboratoire Temps Espace de l'OP.

LNE-CETIAT

Le Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques, à Villeurbanne, est chargé des références nationales pour l'hygrométrie, la débitmétrie liquide-eau et l'anémométrie.

LNE-ENSAM

Le laboratoire de métrologie dynamique au sein de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris est en charge des références de pression en régime dynamique.

LNE-TRAPIL

Le laboratoire de débitmétrie liquide de la Société Trapil, à Genevilliers, est responsable des références nationales de débitmétrie des hydrocarbures liquides.

LNE-LADG

Le Laboratoire Associé de Débitmétrie Gazeuse, au sein de la société Cesame-Exadebit, à Poitiers, est responsable des références nationales de débitmétrie des gaz à haute pression.

LNE-LTFB

Le Laboratoire Temps-Fréquence de Besançon, au sein de SupMicrotech-ENSMM et de Université Bourgogne Franche-Comté, est en charge de la dissémination des références nationales de temps et de fréquence, notamment pour les mesures d'intervalle de temps, les étalonnages en fréquence et les mesures de bruit de phase dans le domaine RF.

LNE-IRSN

Le laboratoire de métrologie et de dosimétrie des neutrons (LMDN) de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, à Cadarache, est en charge des références nationales pour la dosimétrie des neutrons.
En 2025, l'IRSN et l'ASN ont fusionné pour devenir l'ASNR.

LA RECHERCHE EN MÉTROLOGIE ET ESSAIS : UN GAGE DE PERTINENCE ET D'EFFICACITÉ DES NORMES

La normalisation française, européenne ou internationale s'appuie sur divers experts techniques dont ceux de la mesure et des essais. Et depuis 2015, l'Union européenne finance des projets de recherche prénormative pour créer ou adapter des normes aux nouvelles technologies et aux besoins des industriels. Les chercheuses et chercheurs du LNE et du RNMF y prennent toute leur part.

L'excès de normes serait-il préjudiciable à l'innovation ? Sans elles, il serait surtout impossible d'assembler des éléments de structures complexes, d'assurer le contrôle qualité de la production, de garantir la sécurité de biens de consommation, ou encore de mener des actions en faveur de l'environnement... D'un mot, les normes sont indispensables au fonctionnement d'une société industrialisée. En apportant des référentiels partagés, elles facilitent la compréhension, le développement et la reconnaissance de ceux qui s'y réfèrent. Aux côtés des organismes de normalisation, le LNE et les laboratoires du RNMF sont des acteurs à forte valeur ajoutée dans les processus d'élaboration des normes.

Une norme est une spécification technique approuvée par un organisme reconnu de normalisation, élaborée par consensus, d'application volontaire, et peut aussi être citée dans une réglementation. « Les normes sont ainsi à la croisée de l'efficacité technique et du respect de l'intérêt général », précise Eveline Domini, chargée de coordonner les actions du LNE en normalisation. Concrètement, les normes sont élaborées par des organismes de normalisation : AFNOR et Bureaux de Normalisation Sectoriels au niveau national ; CEN, CENELEC et ETSI à l'échelle européenne ; et ISO, IEC et ITU au niveau mondial. Elles sont le fruit du travail mené par des comités techniques où siègent des représentants des pouvoirs publics, des industriels,

des associations de consommateurs, des scientifiques... et des experts de la mesure et des essais. « Les métrologues et ingénieurs d'essais, contribuent à l'identification de besoins de normes, à leur rédaction et aux études et tests préalables nécessaires pour fournir des données chiffrées ou pour définir des protocoles de test fiables », détaille la spécialiste. À noter que l'activité à finalité de normalisation du LNE, en tant qu'opérateur de l'État français, est l'une de ses missions de service public.

Un exemple concret ? Des experts du LNE participent aux comités techniques, AFNOR D21A et D21B, sur l'alimentarité des ustensiles culinaires. Fin 2021, un industriel de la métallurgie s'est tourné vers le premier comité avec le projet de commercialiser des contenants métalliques utilisables dans un four à micro-ondes. En l'absence de normes sur le sujet, il souhaitait voir préciser les conditions d'utilisation de son produit. Comme l'explique Véronique Lemarinier, spécialiste en physico-chimie des matériaux au LNE, « à la suite de réunions, nous avons défini des protocoles d'essais et réalisé des tests en laboratoire qui ont conduit à la rédaction d'une norme pour qualifier les tests de performance et de sécurité permettant d'utiliser des contenants métalliques dans des fours à micro-ondes. » Publiée en 2023, cette norme française est désormais en étude pour être étendue au niveau européen.

Un autre cas concret est la publication, en novembre dernier, du nouveau



MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE D'UN ISOLANT



Règlement européen des produits de construction (RPC), établissant leurs conditions de mise sur le marché. Comme l'explique Alain Koenen, expert des produits d'isolation thermique au LNE, « en amont le LNE, avec l'appui des parties prenantes françaises, a réalisé une synthèse pour l'État de l'ensemble de la réglementation française en la matière. Chaque pays membre de l'UE a fait de même, ce qui a servi de base à la Commission européenne pour définir de nouvelles règles associées au marquage CE. En retour, nous travaillons avec le CEN pour adapter les normes existantes à cette nouvelle réglementation et pour intégrer les demandes des États membres dans les normes. »

En amont du processus de normalisation, le LNE déploie une importante activité de recherche dite prénormative. Comme l'expose Maguelonne Chambon, directrice de la Recherche du laboratoire, « ces travaux consistent à développer des méthodes de mesures fiables, des protocoles d'essai et l'instrumentation permettant de les mettre en œuvre, garantissant que les futures normes seront fondées sur des bases métrologiques solides et adaptées aux avancées technologiques. »

La nécessité de travaux de recherche prénormative en métrologie a été identifiée par l'Union européenne tel un facteur important d'amélioration de la compétitivité de l'industrie européenne. C'est le sens de la plateforme STAIR-EMPIR mise en place en 2015 comme organe de coopération entre le CEN-CENELEC et EURAMET.

Objectif : recenser les besoins à partir desquels des appels à projets collaboratifs de recherche sont lancés sur toutes les thématiques d'EURAMET dans ses programmes EMPIR puis EPM. « Le LNE a ainsi participé à des projets

prénormatifs sur l'environnement, le stockage du CO₂, les batteries, l'hydrogène ou encore l'éclairage ou l'électricité », poursuit la directrice.

Sur ce dernier thème, les spécialistes du LNE ont ainsi par exemple participé au projet EMPIR/DC Grids, finalisé en 2024, pour contribuer à normaliser les mesures sur les réseaux électriques de courant continu afin de garantir la qualité de cette énergie électrique. Comme l'explique Daniela Istrate, ingénieure de recherche au LNE, « ce projet est une réponse aux besoins normatifs exprimés par le CEN-CENELEC pour favoriser le déploiement de réseaux en courant continu nécessaires à la production photovoltaïque, au stockage de l'énergie ou à la recharge des véhicules. » À la clé : des définitions de la qualité de l'énergie, des indicateurs permettant de caractériser les phénomènes pertinents : ondulations, fluctuations, courts-circuits... comme base à la rédaction de futures normes, indispensables aux industriels pour prendre le virage du courant continu. « Au LNE, nous avons travaillé main dans la main avec EDF qui a exprimé des besoins spécifiques de mesures traçables au SI d'ondulations jusqu'à 150 kHz super-

posées au courant continu », ajoute la scientifique.

Autre exemple, dans le domaine de la métrologie chimique, avec le projet EMPIR/SapHTies, lui aussi terminé en 2024, dans le but de réviser une norme ISO sur la mesure spectrophotométrique du pH total (pH_T) des eaux marines en introduisant des référentiels métrologiques qui faisaient défaut. « Cette norme était applicable à des valeurs de salinité (masse [g] de sels dans 1 kg d'eau de mer) comprises entre 20 et 40, typiques de l'eau de mer, détaille Paola Fisicaro, responsable du pôle Métrologie chimique au LNE. Or les océanographes souhaitaient la voir étendue jusqu'à des valeurs de salinité de 5, typiques de l'eau d'un estuaire. »

Les travaux de recherche terminés, un document de recommandations est actuellement à l'étude pour la révision de la norme par un groupe de travail de l'ISO porté par l'AFNOR. Présidé par Enrica Alasonati, elle aussi chimiste au LNE, il rendra ses conclusions dans les prochains mois, illustrant une fois encore la place prépondérante de la métrologie française en normalisation.



LA MÉTROLOGIE EN SOUTIEN À LA NORMALISATION, LA PREUVE PAR LES CHIFFRES

Le LNE engage en moyenne 80 experts chaque année, métrologues et ingénieurs d'essai, impliqués dans près de 90 commissions et groupes techniques de normalisation en France, et environ 20, tant en Europe qu'à l'international. Dans ces groupes de normalisation, ce sont 16 présidences ou animations aux couleurs du LNE en 2024. Quant à l'implication européenne du RNMF, ce sont 21 projets de recherche prénormatifs sur les 37 financés par le programme EURAMET/EMPIR, dont la coordination de 7 d'entre eux. Dans le programme EPM, débuté en 2021, à mi-parcours, c'est déjà 13 contributions françaises au compteur sur 21 financées.

DOSSIER

KILOGRAMME : SA DÉMATÉRIALISATION EN PHASE ACTIVE

Dématérialisé depuis 2019, le kilogramme est désormais fondé sur la valeur d'une constante fondamentale de la mécanique quantique, la constante de Planck. Acteur clé de sa redéfinition en 2018, le LNE est aujourd'hui central pour la mise en pratique de cette nouvelle définition.

Le 20 mai 2019, l'IPK (prototype international du kilogramme), ou grand K, utilisé depuis 1889 comme étalon absolu et comme définition du kilogramme, a tiré sa révérence. Depuis, l'unité de masse n'est plus un artéfact matériel mais, comme les six autres unités de base du système SI, est définie en fonction d'une constante de la physique. Ainsi, comme le mètre se réfère à la vitesse de la lumière ou la seconde à la fréquence d'une transition atomique du césium, le kilogramme est relié à la constante de Planck h , constante emblématique de la physique quantique. Pour mettre en pratique cette nouvelle définition, les laboratoires nationaux de métrologie (LNM) ont mis au point différents dispositifs. Initié dès 2002, le développement d'une balance de Kibble au LNE a placé la France dans le peloton des nations ayant contribué à la mesure de h , préalable indispensable pour inscrire sa valeur numérique exacte dans la définition du SI de 2018. Depuis, la balance française s'est hissée au premier rang européen pour ses performances métrologiques. Et celles-ci ont été mises à profit ces derniers mois pour établir une nouvelle valeur au kilogramme.

Avant la dématérialisation, la valeur du kilogramme étalon était « tout simplement » égale à la masse de l'IPK, conservé au BIPM à Sèvres. Cette définition avait le mérite de la simplicité et de la fonctionnalité. Mais sa mise en œuvre était assez peu universelle. Du reste, en près de 150 ans, la masse du « grand K » a varié d'environ



50 μg et, en parallèle, les répliques de l'IPK ont évolué différemment, montrant toutes les limites d'un étalon matériel pour la définition.

Avec la définition de 2018 qui relie le kilogramme à la constante h , exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, l'unité de masse est devenue en principe intangible. Et c'est dès le milieu des années 1990, que les LNM avaient pris conscience qu'une telle définition était envisageable. Pour la réaliser en pratique, la principale solution, adoptée par le LNE, est une balance de Kibble, du nom du physicien anglais Bryan Kibble qui en eut l'idée en 1976. Ce dispositif permet d'équilibrer le poids d'une masse (force gravitationnelle) avec une force électromagnétique créée par un courant électrique circulant dans une bobine immergée dans un champ magnétique. Les mesures

électriques (tension et courant) établissent alors un lien entre le kilogramme et la constante h car elles sont raccordées au SI par des étalons quantiques.

À terme, chaque LNM pourra réaliser le kilogramme de manière indépendante, à condition d'être capable de peser une masse étalon et d'exprimer sa valeur en fonction de la constante h . Toutefois la réalisation pratique du « kilogramme quantique » relève d'un tour de force expérimental. Aussi, depuis l'entrée en vigueur de la définition de 2018, une valeur internationale est établie par le BIPM pour le kilogramme : une moyenne des valeurs mesurées par quelques LNM dans le monde, lors de campagnes de mesures conjointes organisées régulièrement. Plus précisément, afin d'assurer une continuité avec l'IPK, la valeur actuelle du kilogramme est la

moyenne glissante des valeurs obtenues en 2019, 2021 et lors de l'étude pilote de 2016. À noter qu'à ce jour, les deux mesures assorties des incertitudes les plus faibles – autour de 10^{-8} – réalisées par le laboratoire national canadien et son *alter ego* allemand se révèlent incompatibles, « *signe que nous devons encore améliorer les choses* », juge Matthieu Thomas, chercheur et chef de ce projet au LNE. C'est l'un des enjeux de la comparaison débutée en septembre dernier, à laquelle participent neuf LNM.

La balance française a été construite au LNE à Trappes, dans un bâtiment conçu spécialement pour l'accueillir. L'infrastructure expérimentale repose sur une dalle de béton de 33 m² et 2 m d'épaisseur, pesant 150 t et supportée par des pieux de 12 m de hauteur enfoncés dans le sol. « *C'est indispensable pour se prémunir contre toute vibration extérieure* », commente le physicien. De même, afin d'éviter de « fausser » les mesures par la moindre poussière ou quelque perturbation électromagnétique, l'ensemble est installé dans une salle blanche et est protégé par une cage de Faraday. La structure en aluminium de la balance est placée dans une enceinte à vide (hauteur 3 m et diamètre 2 m) dont la température est contrôlée à 0,1 °C près. Pour le reste, mécanique, fléau, source de courant, circuit magnétique, bobine... « *tout a été conçu et développé par les équipes du LNE, en collaboration avec les équipes « Longueur » et « Masse » du LNE-CNAM, et aucun élément n'a d'équivalent dans le commerce* », précise le chercheur.

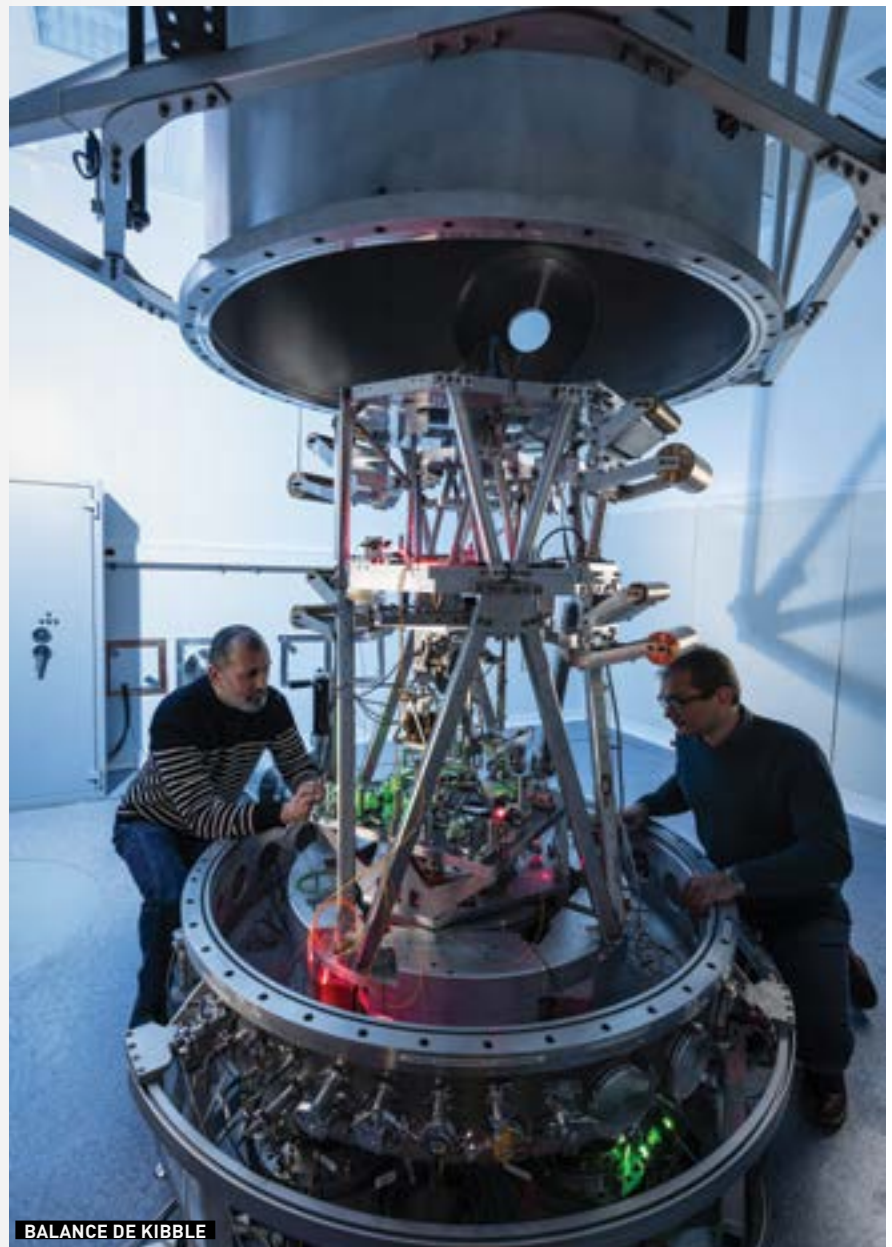
La nécessité d'un tel soin s'explique par la complexité du protocole de pesée, imaginé par B. Kibble, qui comporte deux grandes étapes. Lors de la première étape, dite statique, la masse à évaluer est posée sur le plateau de la balance. Afin de rétablir l'équilibre et compenser la force de pesanteur exercée sur la masse, une force magnétique de sens opposée est créée en faisant circuler un courant dans la bobine suspendue autour du plateau. La valeur de ce courant d'équilibre est alors déterminée par mesure de la tension aux bornes d'une résistance connue avec précision. « *La traçabilité au SI de la mesure de cette résistance est assurée par son étalonnage par rapport aux étalons quantiques de résistance [effet Hall quantique] par le laboratoire de*

métrologie électrique, voisin », indique Matthieu Thomas. La tension est, quant à elle, déterminée en utilisant un réseau de tension Josephson, structure micro-électronique qui, lorsqu'elle est irradiée par une onde électromagnétique de fréquence précise, délivre une tension dont la valeur ne dépend que de cette fréquence, de la charge élémentaire et... de h . La micro-onde d'irradiation est, elle, synchronisée à celle d'une horloge au rubidium asservie sur une référence de fréquence captée par un récepteur GPS et raccordée aux étalons nationaux de fréquence par le LNE-SYRTE.

Ce n'est pas tout. Lors de la seconde étape, dite dynamique, la masse est

retirée de la balance et la bobine est déplacée verticalement à vitesse constante dans un champ magnétique. « *À cette fin, nous avons mis au point un système de guidage qui garantit des écarts maximaux de quelques micromètres et de quelques microradians pour des déplacements d'une dizaine de millimètres* », précise le métrologue. Une tension proportionnelle à la vitesse de déplacement, au champ magnétique et à la longueur de la bobine apparaît alors aux bornes de cette dernière.

En combinant les relations entre les grandeurs mises en jeu dans les deux étapes, le champ magnétique et la longueur de la bobine (difficiles



BALANCE DE KIBBLE

DOSSIER

à mesurer] s'éliminent de l'équation finale qui permet de déterminer la masse. Celle-ci est *in fine* fonction du courant mesuré lors de la phase statique, de la tension aux bornes de la bobine et de la vitesse de déplacement mesurées lors de la phase dynamique, sans oublier l'accélération de la pesanteur g qui est déterminée au centre de gravité de la masse. En pratique, pour mesurer cette tension en phase dynamique, les métrologues utilisent un réseau de tensions Josephson, étalon quantique primaire, et la vitesse de déplacement de la bobine est obtenue par la mesure interférométrique de longueurs et la mesure de temps, toutes deux raccordées au SI. À noter que la valeur de l'accélération de la pesanteur, qui varie dans l'espace et le temps du fait notamment des marées, est fournie toutes les minutes par le LNE-SYRTE en charge du laboratoire national de gravimétrie, mitoyen ! Comme le résume le métrologue, « aucune autre expérience de métrologie n'implique autant de grandeurs (longueur, temps, fréquence, résistance et tension électrique, gravité, et même température), à mesurer simultanément sur un même objet. La balance de Kibble du LNE est d'une certaine manière le point focal du laboratoire. »

Mise en place initialement dans la perspective de la redéfinition du kilogramme, l'installation a d'abord été utilisée dans un mode « inversé » afin de mesurer la constante de Planck



ÉCHANGEUR D'ÉTALONS DE MASSE

BALANCE À FORCE ÉLECTROSTATIQUE : RÉALISER ET DISSÉMINER DES RÉFÉRENCES JUSQU'AU MILLIGRAMME

Administration de médicaments, expériences de biotechnologie, dépôt de couches minces... de nombreuses applications nécessitent l'étalonnage d'étalons de masse dans la gamme du milligramme et en deçà. Or le raccordement des sous-multiples du kilogramme à la référence du kilogramme « quantique » nécessite de nombreuses comparaisons successives d'étalons qui créent une inflation d'incertitudes de mesure. Ainsi, de l'ordre de 10^{-8} pour une masse autour de 1 kg, elles atteignent 10^{-4} dans la gamme de 1 mg. Pour pallier cette difficulté, le LNE développe depuis 2021 une expérience pour mesurer des masses inférieures à 1 mg, qui reliera directement la valeur de la masse à la constante de Planck. Elle repose sur une balance à force électrostatique qui permet de réaliser un équilibre entre le poids d'une masse et la force d'attraction entre deux électrodes d'un condensateur soumises à une différence de potentiel électrique. Raccordée aux étalons quantiques électriques, la mesure de cette tension établit le lien entre la masse ainsi déterminée et la constante h .

Comme suite aux premières mesures réalisées l'année dernière, les métrologues du LNE établiront cette année une caractérisation métrologique de leur dispositif. L'objectif visé est d'améliorer d'au moins un facteur 10 l'incertitude d'étalonnage des plus faibles masses.

à partir de l'ancienne définition de l'unité de masse. Avec des incertitudes de mesure de $5,7 \times 10^{-8}$, le laboratoire français, aux côtés des LNM états-unien et canadien, a fait partie des laboratoires ayant fourni une valeur de h au moyen d'une balance de Kibble avec une incertitude conforme aux prescriptions du CIPM.

Concernant la comparaison internationale débutée fin 2024 sur la mesure d'un kilogramme étalon, les métrologues du LNE visent une incertitude inférieure à 4×10^{-8} sur leur mesure de masse, ce qui en fera la plus précise réalisée avec une balance de Kibble en Europe, et la troisième au niveau mondial. « Au regard des résultats obtenus à la fin de l'année passée, cet objectif est réaliste », prédit le scientifique. Pour y parvenir, l'équipe en charge de l'expérience y a apporté de nombreuses améliorations par rapport à la version de 2021. En particulier, le séquençage des mesures et les critères d'asservissement ont été entièrement révisés. De plus, le moteur qui permet de déplacer la bobine durant la phase dynamique a été remplacé par une version « sans contact ». À la clé : une réduction du bruit expérimental d'un facteur 6 par rapport à 2017.

Prochain objectif : que chaque LNM soit en mesure de réaliser le kilogramme de manière indépendante. « Cela sera possible lorsque d'une part l'ensemble des dispositifs expérimentaux délivreront des valeurs compatibles, d'autre part lorsque les incertitudes des mesures réalisées par l'ensemble des laboratoires nationaux qui prétendent réaliser le kilogramme seront inférieures à 2×10^{-8} , indique Matthieu Thomas qui ajoute : c'est notre objectif ! » Dès lors, la dématérialisation de l'unité de masse sera totale, à l'instar des autres unités de base du SI.

LE LNE, DOUBLE INVITÉ D'HONNEUR DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

La métrologie est essentielle pour avancer sur les grands enjeux technologiques, sociétaux et environnementaux de notre temps. En 2024, les spécialistes du LNE ont eu l'occasion de l'illustrer à travers une série de conférences données lors de deux séances thématiques organisées à l'Académie des technologies. Établissement public placé sous la tutelle du ministre chargé de la recherche et sous la protection du Président de la République, il a pour but « une appropriation toujours plus raisonnée et collective des technologies ».

Ainsi, la séance du 10 janvier avait pour thème *La transformation numérique, les sciences des données et l'innovation*. Dans ce cadre, Félicien Schopfer, directeur du Programme Technologies Quantiques au LNE a axé sa présentation sur la mesure des performances des technologies quantiques, un sujet en lien avec le Plan National Quantique au sein duquel le LNE occupe une place de haute valeur stratégique.

A suivi, Agnès Delaborde, responsable du département Évaluation de l'Intelligence Artificielle, qui a notamment apporté un éclairage sur la dynamique du LNE sur le sujet de l'IA Act européen et présenté les plateformes LE.IA Simulation et Immersion, pour l'évaluation de l'intelligence artificielle du laboratoire.

Enfin, Nicolas Fischer, responsable du département Sciences des Données et Incertitudes, a expliqué l'importance de développer un cadre métrologique permettant d'évaluer de manière fiable l'incertitude des résultats de l'apprentissage automatique dans une approche globale.

Lors d'une seconde séance qui s'est tenue le 27 mars, trois autres expertes du LNE sont intervenues sur le thème *Environnement, changement climatique et santé : quel apport de la métrologie ?* en présence de Valérie Masson-Delmotte, climatologue. Paola Fisicaro, directrice de recherche au LNE, a donné une conférence sur les défis métrologiques



associés à la mesure de l'acidification de l'océan, une problématique cruciale pour le suivi à long terme des effets du dérèglement climatique en cours.

Puis Nathalie Guigues, chef de projet au LNE, a présenté l'importance de la mise en œuvre d'une métrologie adaptée aux outils innovants de surveillance de la qualité de l'eau, dans un contexte réglementaire qui impose des mesures en temps réel de données chimiques, microbiologiques et biologiques.

Enfin, Amandine Bœuf, chef de projet au LNE, est intervenue sur le thème des hormones stéroïdiennes et de la métro-

logie dans le contexte du concept *One Health* qui propose une approche globale des enjeux sanitaires, intégrant la santé des animaux, des végétaux et des humains, ainsi que les perturbations de l'environnement.

L'ensemble de ces présentations a démontré le caractère indispensable de la métrologie pour accompagner et soutenir le développement technologique, et garantir que celui-ci s'effectue au service de la société et dans le respect de l'environnement. Cette nouvelle série de conférences montre les liens forts désormais tissés entre l'Académie des technologies et le LNE.

« LES PRÉSENTATIONS ONT DÉMONTRÉ LE CARACTÈRE INDISPENSABLE DE LA MÉTROLOGIE POUR ACCOMPAGNER ET SOUTENIR LE DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE »

LABORATOIRE DE MÉTROLOGIE DIMENSIONNELLE : LE MÈTRE DANS TOUS SES ÉTATS

Aux fondements du SI, le mètre est aujourd'hui réalisé par des méthodes optiques. Au LNE-LCM, opticiens et mécaniciens travaillent main dans la main afin d'assurer la traçabilité des mesures dimensionnelles à l'unité de longueur du SI. Leurs travaux de développement de divers instruments de mesure permettent à l'industrie de gagner en justesse et en efficacité.

Au sein du laboratoire commun de métrologie (LCM), regroupement de laboratoires du LNE et du CNAM depuis 2008, c'est une dizaine de personnes, opticiens et mécaniciens, qui forme l'équipe de métrologie dimensionnelle du LNE-LCM située dans les locaux historiques du LNE à Paris. En charge de la référence nationale de longueur, ce sont des spécialistes des mesures de longueur d'onde, d'indice de réfraction, de distance, de quelques nanomètres à plusieurs kilomètres, et aussi d'angle, de surface ou de volume, grandeurs dont ils assurent la traçabilité au mètre. Pour ce faire, ces chercheurs mènent de nombreux projets, notamment dans le cadre européen, afin d'anticiper l'évolution des besoins de l'industrie aéronautique, automobile ou encore des travaux publics.

Dès 1983, l'unité SI de longueur avait été dématérialisée : un mètre est égal à la longueur du trajet parcouru par la lumière dans le vide pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde. Cela a été réaffirmé par la définition du SI de 2018 où la constante physique prise comme référence pour le mètre est la vitesse de la lumière dans le vide. Pour mettre en pratique cette définition, un comité du CIPM, commun pour la longueur et le temps, recommande une liste de transitions atomiques, ioniques ou moléculaires. Sa mise en œuvre est donc fondée sur des méthodes optiques.

En France, le mètre est matérialisé par la longueur d'onde dans le vide d'un laser



hélium-néon asservi sur une fréquence de transition de la molécule d'iode-127. Cet étalon national est comparé aux autres lasers étalons nationaux dans le monde. « *En pratique, l'étalon de longueur est relié à la longueur d'onde du rayonnement émis par un laser étalon et les mesures de longueur sont réalisées par interférométrie* », expose Jean-Pierre Wallerand, en charge de la réalisation pratique du mètre. Le laboratoire dispose aussi de différents lasers raccordés aux références nationales de fréquence à l'aide d'un peigne de fréquence issu d'un laser femtoseconde. « *Au LNE-LCM, les longueurs d'onde optique sont mesurées au mieux avec une incertitude relative de quelques 10^{-11} , soit deux ordres de grandeur de mieux que les demandes de raccordement les plus exigeantes d'utilisateurs scientifiques ou industriels* », poursuit le spécialiste.

À partir de ces lasers étalons, les métrologues opticiens étalonnent d'autres lasers en longueur d'onde, notamment ceux des mécaniciens du laboratoire à partir desquels ces derniers étalonnent un ensemble d'étalons matériels pour raccorder divers bancs de mesure dimensionnelle. « *Nous étalonnons toute une gamme d'étalons, détaille José Salgado, en charge des références matérielles : des diamètres de trous, cylindres ou sphères, mais aussi des polygones et des codeurs angulaires pour les angles. Nous délivrons ainsi environ 600 certificats d'étalonnage par an, avec l'incertitude la plus faible en France.* »

Les références de longueur sont également des références pour les mesures d'écart de forme : rectitude, planéité et circularité. Depuis 2021, le laboratoire dispose d'une machine de mesure primaire

de cylindricité. « Plusieurs stratégies de mesure peuvent être adoptées : section par section ou bien selon une trajectoire hélicoïdale qui, tout en accédant à une forme plus complexe, permet de réduire les incertitudes de mesure, comme par exemple sur les systèmes étalons pistons-cylindres de mesure de la pression », explique l'ingénieur mécanicien.

Outre le maintien au meilleur niveau des références de longueur, plus largement, les métrologues du « dimensionnel » développent des méthodes et des instruments destinés aux mesures dans « toutes les dimensions ».

L'une des spécialités maison : les mesures de grandes distances. Pour ce faire, le laboratoire a mis au point un télémètre laser original dont la particularité est d'être fibré. Sans le déplacer, il est ainsi connectable à plusieurs têtes de mesure, ce qui simplifie les mesures. Développé à l'origine pour des besoins en géodésie ou en travaux publics, cet instrument a aussi été mis en œuvre pour le projet européen EMPIR/GeoMetre pour déterminer le point de référence d'un radiotélescope. En parallèle, « nous avons développé une méthode dite de multilatération qui permet d'utiliser le télémètre pour déterminer le positionnement de pièces industrielles dans de grands volumes avec une incertitude comprise entre 10 et 50 μm », décrit Joffray Guillory. L'année dernière, ces recherches ont été publiées dans la revue *Measurement Science and Technology*, qui ont valu à Joffray Guillory, Daniel Truong et Jean-Pierre Wallerand, le Prix 2023 du meilleur article décerné par l'éditeur.

À l'autre extrémité des distances, les experts en métrologie dimensionnelle développent actuellement un système capable de mesurer les défauts de positionnement d'un robot à 10 nm près à l'aide d'une instrumentation embarquant pas moins de 6 interféromètres dans un boîtier de quelques centimètres de côté, notamment dans le cadre du projet NanoLab. « L'état de l'art des robots est de l'ordre de 0,1 μm , précise Alain Vissière. Nous pourrions donc améliorer les systèmes d'un facteur 10 ! »

La recherche en métrologie dimensionnelle répond aussi à des problématiques industrielles bien spécifiques. C'est typiquement le cas de la fabrication additive (FA). Car, si cette technique permet la fabrication de pièces mécaniques d'une grande complexité, l'infrastructure métrologique adaptée à cette technique reste encore à développer. Et le laboratoire y contribue depuis une dizaine d'années. Le laboratoire a par exemple proposé des étalons matériels représentatifs de pièces fabriquées par FA pour l'étalonnage des tomographes X qui constituent le moyen de mesure de référence pour détecter d'éventuels défauts dans une pièce conçue par synthèse 3D. « Cela a été mené grâce au projet AdvanCT. Et actuellement, nous participons au projet SensMonCT II, dans le but d'identifier les limites de détection en termes de taille de défauts », complète Anne-Françoise Obaton, qui vient par ailleurs de contribuer à la rédaction de deux projets de normes : la première, proposée à l'ISO/ASTM, sur les mesures dimensionnelles par tomographie ; la seconde, au niveau américain, sur la limite de détection de cette technique.

Pour les industriels, le contrôle de pièces manufacturées, si possible « en ligne », est une problématique essentielle. Dans ce but, les scientifiques déploient depuis quelques années un système de mesure sans contact, de stéréovision, susceptible, contrairement à une machine 3D, d'être intégré sur une ligne

de fabrication. Son principe ? Une mire lumineuse projetée sur une pièce à mesurer et deux caméras pour acquérir les images de cette mire qui, après traitement, permettront de caractériser cette pièce en 3D. Outre ses aspects instrumentaux, le système a nécessité un important développement logiciel de reconstruction de formes.

Cette dimension « numérique » de la R&D du laboratoire s'illustre également à travers le développement d'outils de simulation de type « jumeau numérique ». Comme l'explique Hichem Nouira, « les mesures dimensionnelles dépendent de très nombreux paramètres. Ainsi, un modèle multiphysique d'un instrument de mesure permet de déterminer l'impact de chaque facteur et de mieux déterminer les incertitudes. Si de plus ce modèle est alimenté par un flux de données provenant d'une machine à mesurer, il est alors possible d'intervenir en temps réel sur la mesure pour l'affiner. » Concrètement, ces chercheurs développent actuellement des modèles de jumeau numérique pour la machine de cylindricité du laboratoire, dans le cadre du projet VIDIT, pour une machine-outil à 5 axes, en collaboration avec un industriel grâce au projet ADAM débuté fin 2024, ou encore pour un système de détection sans contact par balayage intégrant un système de positionnement par multilatération, au sein du projet européen DI-Vision.

Un signe indubitable que la « petite » équipe de métrologie dimensionnelle du LNE-LCM, voit résolument les choses en grand !



ÉTALONNAGE D'UN PALPEUR À L'AIDE D'UNE MACHINE À MESURER TRIDIMENSIONNELLE DE LA PLATEFORME MELODI DU LNE

PRIX LNE DE LA RECHERCHE 2024 :

PLEINS FEUX SUR LA MÉTROLOGIE DES RAYONNEMENTS !

Le Prix LNE de la Recherche est décerné cette année à Jean-Marc Bordy, expert pour les rayonnements ionisants, et Jimmy Dubard, expert pour les rayonnements optiques.

Jean-Marc Bordy, vous êtes directeur de recherche au CEA et Fellow Expert sur les problématiques de dosimétrie au LNE-LNHB Métrologie de la dose, quelle est votre spécialité ?

Jean-Marc Bordy : J'interviens dans le domaine de métrologie de la dose en lien avec la radioprotection des travailleurs, du public et de l'environnement, ainsi que pour maîtriser l'exposition des patients lors d'un diagnostic ou d'une radiothérapie. C'est en continuité avec le début de ma carrière en radioprotection au CEA, où j'ai contribué au développement de dispositifs pour la dosimétrie des neutrons et organisé la première comparaison européenne de dosimètres individuels.

Jimmy Dubard, vous êtes responsable du Département photonique du LNE, quel a été votre parcours ?

Jimmy Dubard : J'ai soutenu ma thèse de doctorat en 1986 sur la caractérisation de matériaux semiconducteurs au Centre National d'Études des Télécommunications. Je suis ensuite entré au LCIE en 1990 où j'ai contribué à mettre en place une métrologie pour les fibres optiques et les cellules solaires photovoltaïques. J'ai pris en charge l'activité de photométrie du laboratoire et j'ai développé un banc de dimension réduite pour l'étalonnage des luxmètres.

Jean-Marc Bordy, vous avez rejoint le LNE-LNHB MD en 2003 et en avez été à la direction jusqu'en 2010. Quelle activité y avez-vous développée ?

Jean-Marc Bordy : Pendant mes deux mandats consécutifs, le laboratoire a développé une importante activité en dosimétrie de référence pour la radiothérapie externe et de contact et a initié les études pour le contrôle qualité des traitements, dont la dosimétrie 3D par gels. Nous avons développé les méthodes de dosimétrie individuelle pour le cristallin suite à la proposition de la CIPR (Commission internationale de protection radiologique) de diminuer sa limite d'exposition, et mis au point un banc d'étalonnage de dosimètres pour l'environnement. Nous avons aussi amplifié la collaboration avec nos collègues étrangers en participant à de nombreux projets de recherche européens.

Jimmy Dubard, vous avez été recruté en tant que responsable du Département Photonique du LNE en 2003. Quelles directions avez-vous fait prendre au laboratoire ?

Jimmy Dubard : J'ai contribué à consolider l'expertise du laboratoire dans les domaines de la caractérisation des LED et des cellules photovoltaïques. Sur les LED, j'ai participé à différents projets européens visant à évaluer leurs performances colorimétriques. De même, plusieurs projets sur les cellules photovoltaïques m'ont notamment conduit à développer un banc de



JEAN-MARC BORDY



JIMMY DUBARD

caractérisation des mini-modules photovoltaïques sous éclairage artificiel. En 2009, j'ai par ailleurs participé à la création de CERTIOLIS, un laboratoire d'évaluation des modules photovoltaïques.



Vous avez par ailleurs tous les deux une activité d'expert, quelle est-elle ?

Jean-Marc Bordy : En tant qu'expert, je suis l'un des signataires du Rapport ICRU-95 (*International Committee for Radiological Units*) de 2021, consacré à la redéfinition des grandeurs dosimétriques en radioprotection.

Je suis également membre de la délégation française à l'UNSCEAR (comité scientifique des Nations Unies sur les effets des ray. ionisants) et co-coordonateur d'un groupe de travail de l'ISO sur les références pour la radioprotection.

Jimmy Dubard : Je participe au comités AFNOR sur les luminaires et les fibres optiques. Je suis également le représentant français au sein du Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie du CIPM.

Au sein du COFRAC (France) et du BELAC (Belgique), j'ai un rôle d'évaluateur de laboratoires industriels. Enfin, au LNE, je suis responsable d'une formation en radiométrie et photométrie à destination des industriels.



Que représente pour vous le Prix LNE de la recherche ?

Jean-Marc Bordy : C'est un très grand honneur que je souhaite partager avec toutes les personnes avec qui j'ai travaillé au laboratoire et plus largement avec toutes celles qui ont partagé leur expérience avec moi depuis mon entrée au CEA comme technicien à l'IPSN (intégré ensuite à l'IRSN).

Jimmy Dubard : C'est une reconnaissance de mon activité tournée vers les besoins industriels.

Cette façon d'orienter mes travaux de recherche m'a permis de travailler pour de nombreuses applications optiques et au contact de personnes très différentes, ce qui a toujours été pour moi un moteur important.



LE PRIX LNE DE LA RECHERCHE



Créé en 2009, le prix LNE de la recherche a tour à tour récompensé des chercheurs sur des thématiques et des sujets aussi variés que les nanotechnologies, la santé, l'environnement, les télécommunications, l'énergie, le transport les technologies de l'information, ou encore les matériaux.

En plus de 10 ans, le LNE a récompensé plus d'une quinzaine de chercheurs ayant tous su allier science et pragmatisme, pour des travaux de recherche à fort impact tant sur la science que sur l'industrie ou la société.

150^e ANNIVERSAIRE DE LA SIGNATURE DE LA CONVENTION DU MÈTRE : LE LNE À LA FÊTE !

Le 20 mai 2025, la communauté mondiale de la métrologie fêtera le 150^e anniversaire de la signature de la Convention du mètre. À cette occasion, le LNE propose un cycle de conférences grand public débuté dès janvier pour mettre en avant toutes les facettes de la mesure.

Santé, nanotechnologie, IA, énergie, climat... la mesure est partout ! Et l'acte de naissance de la métrologie contemporaine, science de la mesure, remonte au 20 mai 1875, alors que 17 pays signaient à Paris la Convention du mètre. Ce traité international, qui a fondé le Bureau international des poids et mesures pour conserver les prototypes internationaux du mètre et du kilogramme, a également unifié le système d'unités de mesure sur la base du système métrique décimal. Et en réponse à l'industrialisation et à la mondialisation des échanges, ce système international d'unités a progressivement évolué jusqu'au SI, Système international d'unités, adopté en 1960, permettant une multitude de mesures cohérentes entre elles. Bien que robuste, ce système évolue encore, au gré des besoins scientifiques ou sociétaux.

À l'origine du système international d'unités, étaient trois unités de référence : le mètre, le kilogramme et la seconde. Avec l'évolution des connaissances scientifiques, des progrès technologiques et des besoins de la société, le SI s'est petit à petit enrichi d'unités de base. Il en compte aujourd'hui sept. Par ailleurs, les définitions des unités évoluent également. La dernière évolution en date, 2018, adoptée par les 64 États Membres actuels de la Convention du mètre, a établi que chacune des 7 unités de base du SI repose sur une constante de la physique. En outre, à l'horizon 2030, la définition de la seconde sera modifiée pour réaliser l'unité de temps 100 fois mieux qu'aujourd'hui.

En tant qu'institut national de métrologie, le LNE fédère les laboratoires du Réseau national de la métrologie française (RNMF) et est, en France, le garant de la précision, de la traçabilité au SI et de la dissémination des étalons nationaux de mesure. Incontournable sur la scène internationale, il a notamment contribué pour une part importante à la redéfinition du kilogramme, de l'ampère et du kelvin, en 2018. Au quotidien, les métrologues français réalisent les unités du SI, étalons nationaux, les maintiennent au meilleur niveau d'exactitude, et étalonnent les références pour un très large éventail de mesures.

Celles-ci sont indispensables à la quasi-totalité des activités humaines. Sans système cohérent d'unités, il ne serait pas possible de garantir la fiabilité et la comparabilité d'un examen sanguin, le respect des normes sur les nanoparticules dans les produits de consommation ou le juste dimensionnement

d'une pièce critique pour l'aéronautique. En parallèle, la métrologie joue un rôle crucial pour relever les défis du climat, en garantissant le suivi de l'évolution de la température sur Terre et des paramètres qui caractérisent l'environnement, ou en développant les méthodes de caractérisation et d'évaluation des technologies quantiques ou de l'intelligence artificielle.

À l'occasion du 150^e anniversaire de la signature de la Convention du mètre, le LNE invite le public à un cycle de conférences thématiques tout au long de l'année 2025. Chaque mois : histoire, énergie, vie quotidienne, numérique... des spécialistes exploreront toutes les facettes de la mesure. Lors du premier rendez-vous, le 16 janvier, Christophe Salomon, membre de l'Académie des sciences, Marc Himbert, professeur émérite au CNAM et Matthieu Thomas, ingénieur de recherche au LNE, ont proposé au public de découvrir l'histoire du mètre et du kilogramme, ainsi que l'évolution des systèmes de poids et mesures de l'Antiquité à nos jours. D'autres rendez-vous sont à suivre.

Venez nombreuses et nombreux pour fêter avec le LNE la métrologie qui est au cœur de nos vies !



FÊTE DE LA SCIENCE 2024 : CINQ FILMS POUR SENSIBILISER À LA SURVEILLANCE ET À LA PROTECTION DES OCÉANS

Du 3 au 13 octobre dernier, l'édition 2024 de la Fête de la Science proposait de larguer les amarres en mettant à l'honneur la thématique « Océans et savoirs ». « Pour le LNE, cette manifestation est toujours un moment important qui permet d'entretenir un lien avec le grand public et de montrer le rôle essentiel de la métrologie pour répondre aux grands enjeux », développe Valérie Mulot, responsable de la communication du laboratoire. Et à n'en pas douter, réchauffement climatique, biodiversité, pollution... la surveillance des océans en est un ! Pour y sensibiliser le public et montrer l'importance de disposer de mesures fiables et traçables au Système international d'unités, le service de communication du LNE a proposé « Inf'eau », une série de cinq films courts qui présentent les activités du laboratoire en lien avec l'océan.

Mises en ligne sur les réseaux sociaux (LinkedIn, X et YouTube), ces vidéos portent sur les thèmes « IA et biodiversité marine », « Les eaux rejetées par les centrales nucléaires », « Les microplastiques dans les océans », « L'acidification des océans » et « La qualité des eaux littorales ». « Pour chacune d'elles, nous sommes partis d'une question posée par un enfant, à laquelle un expert du laboratoire répond de façon pédagogique dans une mise en scène qui mêle animations graphiques et données textuelles et chiffrées », détaille Valérie Mulot. Le résultat : la possibilité de découvrir les effets des activités humaines sur les océans et la biodiversité marine, et la façon dont les métrologues contribuent à les quantifier avec la plus grande précision en vue de les minimiser.



fête de la Science



Cet engagement en faveur des problématiques environnementales est au cœur de « Excellence 2030 », le plan stratégique du LNE pour la période 2025-2030. Construit autour de quatre thèmes : Transition numérique, Compétitivité industrielle, Transition écologique, et Santé et sécurité, il a pour ambition de faire du LNE le laboratoire de référence pour les technologies de demain.

Avec ces cinq films de la série « Inf'eau », toujours accessibles en ligne et déjà visionnés près de 700 fois, le LNE réaffirme le caractère incontournable de la métrologie pour protéger les océans. Et la nécessité d'embarquer les non spécialistes petits et grands dans l'aventure !



COMPÉTITIVITÉ INDUSTRIELLE

Les recherches en métrologie et sur les essais sont indispensables à l'innovation et ce faisant à la compétitivité industrielle. Nanoélectronique, mesure de pièces complexes, acceptabilité des robots, essor de l'IA, télécommunications... Les travaux conduits au LNE et au sein du RNMF sur l'ensemble des thématiques qui dessinent notre avenir technologique en témoignent.



PROJET PHARE

MESURES ÉLECTRIQUES : LE NANOMONDE ACCÈDE À LA PRÉCISION MÉTROLOGIQUE

Le LNE participe activement à la mise en place d'une infrastructure métrologique pour les mesures électriques à l'échelle du nanomètre. Coordinateur de deux projets finalisés en 2024, le laboratoire est désormais en mesure de proposer des prestations d'étalonnage à partir de son SMM et de son C-AFM.

Les avancées dans les domaines de la microélectronique, de l'énergie ou encore des technologies quantiques impliquent des nouveaux matériaux dont il est impératif de maîtriser les propriétés, notamment électriques, à l'échelle du nanomètre. Si l'instrumentation de mesure à cette échelle existe dans l'industrie, l'infrastructure pour assurer la traçabilité des mesures reste encore largement à développer dans les laboratoires de métrologie. Le LNE y contribue depuis plusieurs années déjà. Et, l'année dernière, le projet MetroSMM de la métrologie française et le projet européen EMPIR/ELENA coordonné par le LNE sont parvenus à leur terme. Visant notamment à développer des étalons, à établir des protocoles de mesure, à évaluer les facteurs d'influence et les incertitudes de mesure, ils jettent les bases d'une métrologie adaptée aux mesures électriques réalisées aux plus petites échelles et confirment la place prépondérante du LNE dans ce domaine.

Les principaux instruments de caractérisation des propriétés électriques de matériaux à l'échelle nanométrique sont le microscope à sonde locale électrique micro-onde (SMM), pour accéder aux mesures de capacité, permittivité diélectrique, concentration de dopants, et le microscope à force atomique à pointe conductrice (C-AFM) pour les mesures locales en courant continu de la résistance et du courant.

Concernant les références de mesure de capacité, les métrologues du LNE ont en particulier travaillé à partir de kits d'étalonnage proposés par la société MC2-Technologies. Premier enjeu : les caractériser finement par des simulations, ainsi que l'environnement expérimental de mesure, afin de les utiliser pour étalonner leur SMM. Deuxièmement : fort de cet étalonnage, mettre au point les protocoles de mesure de capacité qui prennent en compte les capacités parasites inhérentes aux microstructures. Pour ce faire, les spécialistes ont développé une méthode de substitution. Comme l'explique François Piquemal, au LNE, « cette méthode permet de caractériser un échantillon inconnu en comparant les mesures aux mesures effectuées sur la structure de référence, dans le même environnement ». En travaillant avec une première version du kit, les chercheurs ont montré qu'il était possible de mesurer une capacité avec une incertitude type de 3 % pour des valeurs comprises entre 0,3 fF et 10 fF. Par la suite, sur la base d'un cahier des charges établi par le LNE, le partenaire industriel a réalisé une nouvelle version de son kit. Résultat : une incertitude sous la barre des 2 % jusqu'à 40 fF quand la cible initiale fixée était de 10 % !

Dans un esprit similaire, au sein du projet ELENA, les chercheurs du LNE, en collaboration avec deux laboratoires du CNRS, le C2N et le GeePs, ont contribué au développement et à la caractérisation du



☞ Trois questions à...

FRANÇOIS PIQUEMAL

Dans quel contexte sont nés les projets MetroSMM et ELENA ?

F.P. : Cela fait une vingtaine d'années qu'industriels et laboratoires académiques effectuent des mesures électriques à l'échelle nanométrique. Pour autant, celles-ci visaient essentiellement à qualifier les propriétés physiques, sans les quantifier, et les mesures n'étaient donc pas comparables entre elles, ni traçables au SI. Mais avec la multiplication des applications des nanomatériaux, le besoin a changé et la mise en place d'une métrologie adaptée à ces mesures est désormais indispensable.

Sur quoi s'appuie l'expertise du LNE pour les mesures électriques à l'échelle nanométrique ?

F.P. : Le LNE accompagne le développement des nanotechnologies depuis leur émergence. En témoigne la mise en place des plateformes CARMEN, MONA puis NAEL qui couvrent un large champ de propriétés des matériaux. Concernant les mesures électriques, nous avons acquis il y a une dizaine d'années un SMM dans un contexte d'expertise existante dans le domaine des mesures hyperfréquences et des champs proches, de plus en plus localisées. L'acquisition du C-AFM est le fruit de collaborations établies avec d'autres laboratoires, comme le GeePs.

Comment se situe le LNE pour les mesures électriques à l'échelle nanométrique, sur la scène mondiale ?

B.F. : Concernant les mesures de résistance et de courant réalisées avec un C-AFM, nous sommes à l'origine des premiers étalons et protocoles de référence. Et pour les mesures de capacité et de permittivité effectuées avec un SMM, c'est le LNE qui a établi le premier bilan d'incertitude complet. Ainsi, nous nous positionnons dans le peloton de tête des laboratoires nationaux de nanométrie électrique.

PROJET PHARE

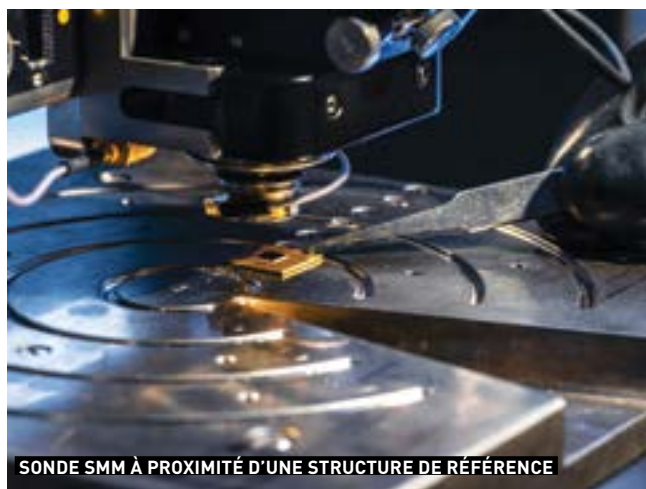


SMM POUR LA MESURE DES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DE NANOMATÉRIAUX

premier étalon pour les mesures électriques réalisées à l'échelle « nano » à l'aide d'un C-AFM.

La puce étalon comporte à la fois des références de résistance et de courant et permet des étalonnages avec une incertitude inférieure à 1 % pour les résistances de 1 k Ω à 1 T Ω , et de l'ordre de 1 % pour les courants compris entre 100 fA et 1 μ A.

À l'issue de ces deux projets, les métrologues du LNE ont déjà commencé à explorer des pistes d'amélioration dans le cadre du projet MetroSMM-2, piloté par José Moran, chef de ce nouveau projet. « L'objectif est d'une part de réduire encore les incertitudes de mesure de capacité, d'autre part de simplifier le processus de mesure », décrit François Piquemal. Pour ce faire, il s'agira de minimiser l'impact des capacités parasites en poursuivant le développement de pointes de mesure blindées, en collaboration avec l'université de Glasgow et l'université de Lille. À la clé : s'affranchir de la méthode de substitution pour la mesure absolue de capacité. Une autre méthode dite « courbe approche retrait » devrait par ailleurs permettre l'étalonnage pour les mesures de capacité inférieure à 400 aF.



SONDE SMM À PROXIMITÉ D'UNE STRUCTURE DE RÉFÉRENCE

En attendant, les développements réalisés donnent d'ores et déjà la possibilité au LNE d'étalonner des références pour les mesures de résistance et de courant par C-AFM et de capacité et de constante diélectrique par SMM. De plus, dans le cadre du projet ELENA, les scientifiques du LNE ont contribué à la rédaction de deux documents normatifs soumis au comité technique TC-113 de l'IEC. Associés à des guides de bonne pratique pour SMM et C-AFM, ces documents devraient être publiés à la fin de l'année et serviront de point d'appui pour le déploiement des nanotechnologies dans l'industrie.

CHIFFRES CLÉS

À l'échelle du nanomètre, le LNE peut désormais mesurer une capacité électrique avec une incertitude inférieure à 2 % entre 0,3 fF et 40 fF.

L'incertitude de mesure de résistance et de courant électriques est de l'ordre du pour cent respectivement entre 1 k Ω et 1 T Ω et entre 100 fA et 1 μ A.

ROBOTS INDUSTRIELS : LEUR POSITION DÉTERMINÉE À 10 MICROMÈTRES PRÈS

De nombreuses industries ont besoin de connaître la position ou l'orientation de robots à quelques dizaines de micromètres près. Dans le cadre du projet européen EMPIR/DynaMITE, le LNE-CNAM a participé à la mise en œuvre d'un système qui réalise de façon autonome et dynamique une telle prouesse. Il a été éprouvé sur un robot à câbles du LIRMM capable de déplacer en autonomie une lourde charge jusqu'à 200 kg.

La mesure de position recourt à deux systèmes complémentaires. Le premier, développé par l'University College London, repose sur une technique de photogrammétrie qui suit en temps réel la position du robot à quelques 100 μm près. Ceci fait, le système de multilatération développé par les métrologues français entre en scène. Fondé sur un télémètre laser fibré, il consiste à mesurer, depuis différents points, la distance à une cible placée sur l'élément dont les coordonnées de position sont à établir.

Comme l'explique Jean-Pierre Wallerand, responsable des références de longueur au LNE-CNAM, « nous avons réalisé un important travail de simulation afin d'optimiser le nombre de mesures à réaliser, de même qu'un bilan d'incertitude rigoureux pour les trois dimensions de l'espace. » Résultat : la position du robot est déterminée



TEST DU SYSTÈME DE MULTILATÉRATION DU LNE-CNAM SUR UN ROBOT À 8 CÂBLES

sans intervention humaine avec une incertitude comprise entre 10 μm et 50 μm , avec une rétroaction sur le robot pour corriger sa position.

Outre leur intérêt direct pour l'industrie, les développements effectués dans DynaMITE sont actuellement mis à profit pour optimiser le processus de positionnement des éléments de la future version du synchrotron SOLEIL géré par le CNRS et le CEA.

LES ÉTATS DE SURFACE DÉSORMAIS TRAÇABLES AU SI

Secteurs médical ou automobile, ingénierie mécanique de précision... dans de nombreux secteurs, il est crucial de pouvoir caractériser finement les états de surface, dont dépendent les propriétés des produits fabriqués. Ainsi, les métrologues du LNE ont participé au projet européen EMPIR/TracOptic. Finalisé en 2024, il visait à mettre en place une chaîne métrologique pour mesurer les états de surface de pièces mécaniques 3D, de manière traçable au SI conformément à la norme ISO-GPS.

Pour leur part, les métrologues français ont respectivement mis à profit leurs moyens de caractérisation dimensionnelle, tactiles et confocaux, pour caractériser des étalons novateurs développés par l'entreprise allemande partenaire *Simetrics*. Sillons, ondulations, cônes, pyramides, U... gravés sur des supports d'une vingtaines de centimètres de côtés, ces références ont de multiples formes dont la taille varie entre 1 mm et 250 μm . Comme le détaille Hichem Nouira, directeur de recherche au LNE, « l'ensemble a permis d'extraire des

paramètres d'état de surface à partir de mesures traçables réalisées par l'intermédiaire d'un profilomètre primaire. »

Pour valider ces nouveaux étalons, les partenaires du projet ont ensuite organisé plusieurs comparaisons. Elles ont permis au LNE de démontrer sa capacité à extraire, à partir de nuages de points de mesure, des paramètres pertinents relatifs à l'état de surface, avec une incertitude de l'ordre de 30 nm, de quoi intéresser de nombreux industriels.

ROBOTS À BASE D'IA : UN RÉFÉRENTIEL POUR ACCROÎTRE LEUR ACCEPTABILITÉ SOCIALE

Comment augmenter l'acceptabilité sociale de solutions robotiques à base d'IA ? La question est importante au regard des promesses de l'intelligence artificielle dans les secteurs de la santé, de l'inspection, de l'entretien des infrastructures ou encore de l'industrie agroalimentaire. Pour y répondre, le LNE a participé au projet européen H2020/Robotics4EU qui s'est terminé l'année dernière.

Concrètement, les ingénieurs français ont développé un outil, le « RoboCompass » qui évalue la maturité sociale et sociétale d'un système à base d'IA. Destiné aux acteurs de la robotique, celui-ci prend la forme d'un vaste QCM configurable comprenant environ 200 entrées. Chacune d'elles porte sur un des aspects de la problématique (apparence du robot, impact écologique, préservation des données privées...), permettant d'un côté de répondre sur les risques associés à l'adoption

sociale du robot, de l'autre de noter les solutions possibles pour les atténuer. « Nous avons segmenté le sujet en plusieurs parties, explicite Anne Kalouguine, ingénieure en IA au LNE. Puis, sur la base d'une cartographie européenne des Bonnes Pratiques relatives à la robotique, ainsi que d'une enquête menée auprès des acteurs de ce secteur, nous avons déterminé les poids relatifs de chaque question. »

À la clé, un score d'acceptabilité sociale pour aider les fabricants de robots à base d'IA à choisir les solutions qui conduiront à leur plus large adoption et à suivre l'impact de leurs décisions. Un accompagnement dans l'utilisation et l'analyse des résultats de cet outil pourra être proposé aux clients du LNE. En outre, le projet a permis d'énoncer des recommandations sur l'IA à visée réglementaire et législative.



VÉHICULE AUTONOME : EN ROUTE VERS L'HOMOLOGATION !



EXPÉRIENCE MENÉE DANS LES RUES DE PARIS (SUR PARIS2CONNECT) POUR LE PROJET PRISSMA

L'essor du véhicule autonome dépend de la mise en place de paradigmes d'évaluation et d'homologation de ses composants d'IA embarqués. Dans le cadre du « Grand Défi IA » lancé par l'État en 2021, c'était l'enjeu du projet PRISSMA finalisé l'année dernière. Aux côtés d'une vingtaine de partenaires industriels ou de recherche, le LNE y a joué un rôle majeur en pilotant trois des huit thématiques abordées.

La première visait à créer un protocole d'évaluation global et à définir des exigences pour l'homologation. « Il s'agit d'un travail préparatoire qui a notamment vu la publication d'un Livre Blanc et dont les recommandations serviront de socle pour la rédaction de futurs règlements et normes », explique Rémi Regnier, responsable du projet au LNE.

Les deux autres thématiques avaient pour objectif de développer des infrastructures permettant la mise en œuvre de protocoles de test, d'une part en simulation, d'autre part en milieux contrôlés. « Nous avons par exemple réalisé des tests en simulation pour mesurer l'impact d'événements météorologiques, ou développé des modules pour l'insertion en réalité augmentée de piétons lors d'essais sur piste », détaille le chercheur.

Pour le LNE, le projet PRISSMA a été l'occasion de mettre à profit le volet « Immersion » de sa plateforme d'évaluation LEIA. De plus, les développements réalisés ont servi à la définition d'un ensemble de services qui, dans le cadre du projet européen *TEF Smart Cities & Communities*, visent à rendre accessibles aux industriels européens des méthodes et des moyens d'essais pour qualifier la performance, la fiabilité et la robustesse de leurs systèmes IA.

« ÉVALUER ET HOMOLOGUER
LES COMPOSANTS D'IA
EMBARQUÉS DANS
UN VÉHICULE AUTONOME »

TÉLÉCOMMUNICATIONS : PRÊT À MESURER L'INTÉGRITÉ DU SIGNAL RF DANS LES SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES

5 G, internet des objets, véhicules autonomes... de nombreuses applications émergentes impliquent des technologies électroniques adaptées au très haut débit d'information, de quelques dizaines de GHz et à terme quelques THz. Par conséquent, il est nécessaire de développer des outils métrologiques pour caractériser ces composants à ces radiofréquences (RF) très élevées. C'était l'objet du projet européen EMPIR/FutureCom, auquel le LNE a participé.

Dans ce cadre, le laboratoire français a été chargé des actions relatives aux références de mesure de l'intégrité du signal se propageant à travers des composants électroniques comme

les circuits logiques programmables (FPGA) qui peuvent gérer des centaines de canaux et des milliers de connexions entrée/sortie sur une même puce, avec tous les risques d'interférences électromagnétiques que cela engendre.

Ainsi, les métrologues en électricité RF ont conçu des structures de référence pour simuler de tels circuits. « *Forts de notre savoir-faire en métrologie des paramètres S, grandeur vectorielle qui décrit le comportement d'un dispositif électronique vis-à-vis des signaux d'entrée, nous avons réalisé une série de mesures pour caractériser l'intégrité du signal selon la géométrie, les dimensions et l'environnement d'une piste électrique de quelques 10 µm de largeur* », détaille Djamel Allal, responsable du projet au LNE. À partir de cela, ils ont ensuite défini des règles pratiques pour concevoir des FPGA.

Par ailleurs, le LNE a participé à l'évaluation de connecteurs coaxiaux « 4.3-10 » utilisés dans les stations de base de télécommunication, lui permettant ainsi de proposer de nouvelles prestations d'étalonnage sur ces composants.



STRUCTURES DE RÉFÉRENCE (SILICIUM) FABRIQUÉES POUR LE JRP FUTURECOM

COMPARAISON D'HORLOGES PAR SATELLITE À L'HEURE NUMÉRIQUE : LA STABILITÉ AMÉLIORÉE

L'exactitude des comparaisons internationales à la base de l'établissement de l'UTC est aujourd'hui limitée par les performances des transferts analogiques par satellites (TWSTFT) des signaux d'horloges. Ainsi, depuis plusieurs années, dans la perspective de la redéfinition de la seconde, le LNE-SYRTE a entrepris un travail de numérisation partielle de ces liaisons satellitaires. L'année dernière, en collaboration avec le LNE-LTFB, les métrologues ont finalisé un projet de la Métrologie Française pour développer une plateforme radio-logicielle (SDR) d'émission et de réception de signaux d'horloges, offrant ainsi un gain en stabilité des échanges.

Précisément, ils ont mis au point une chaîne d'émission fondée sur un dispositif FPGA qui génère les séquences pseudo-aléatoires nécessaires à la numérisation des signaux. Celle-ci est complétée par une chaîne de réception qui symétrise

le lien. « *Le développement de ce modulateur numérique a été réalisé par un code en accès libre, de façon à le partager avec l'ensemble de la communauté internationale du temps-fréquence* », souligne Joseph Achkar, chercheur et responsable du projet au LNE-SYRTE.

À la suite, deux plateformes SDR ont été mises en œuvre respectivement dans les stations « two-way » du LNE-SYRTE à Paris et du LNE-LTFB à Besançon. Elles ont permis de créer un lien satellitaire entre leurs horloges distantes, avec une stabilité inférieure à 100 ps sur un jour. En comparaison, celle-ci était de l'ordre de 200 ps avec le codage analogique précédent. Comme suite à ce travail, les métrologues vont partager leur plateforme avec les laboratoires nationaux allemand, italien et états-unien pour comparer des horloges dans le cadre du réseau international UTC.

HUMIDITÉ DES GAZ ULTRA-PURS : ELLE EST DÉSORMAIS SUIVIE À LA TRACE



Connaître la teneur en vapeur d'eau dans un gaz pur, azote, argon ou hydrogène... est le défi majeur à surmonter pour les producteurs de gaz pour maîtriser les impuretés dans leurs gaz. Améliorer la traçabilité des mesures d'humidité, à l'état de trace, dans des gaz ultra-purs était l'objectif du projet européen EMPIR/PROMETH20 auquel le LNE-CETIAT et le LNE-CNAM ont contribué. Ensemble, ils ont mis au point une méthode novatrice pour mesurer le facteur d'augmentation de mélanges gazeux. Ce paramètre, variable selon le type de gaz, doit être mesuré pour minimiser l'incertitude sur l'humidité du gaz ; mesure cruciale même, si l'eau est à l'état de trace et que le gaz est à haute pression.

Pour y parvenir, les chercheurs français se sont associés pour améliorer leur générateur de gaz pur pour l'un, et pour développer un nouveau moyen de mesure de ce facteur d'augmentation pour l'autre. « Nous avons étendu les capacités de notre générateur de mélange gazeux vers les basses pressions et les faibles humidités » explique Éric Georquin du LNE-CETIAT. Des mélanges « gaz – vapeur d'eau » ainsi bien maîtrisés ont été alors introduits dans le nouveau moyen de mesure mis au point. Ce dernier repose sur un hygromètre à résonateur micro-onde, inspiré d'un thermomètre acoustique du LNE-CNAM, complété

d'un hygromètre à condensation. « Les partenaires du projet ont mesuré le facteur d'augmentation de différents gaz, à de hautes pressions et de basses températures de gelée, ce qui a permis d'améliorer la connaissance de ce paramètre et donc la mesure de l'humidité d'un gaz ultra-pur », complète Nicola Chiodo du LNE-CNAM. Par ce projet, le LNE-CETIAT a aussi pu étendre ses capacités d'étalonnage en humidité vers les températures de gelée proches de -90 °C.

« UNE MÉTHODE NOVATRICE
POUR AMÉLIORER
LA MESURE D'HUMIDITÉ
À L'ÉTAT DE TRACE
DANS UN GAZ »

TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

La nécessaire transition écologique et énergétique de nos sociétés passe par l'adoption de nouveaux usages. Ainsi, des laboratoires du RNMF accompagnent l'essor du recyclage des métaux présents en grande quantité dans nos appareils électroniques. De même, le réseau est aux avant-postes de l'adoption de l'hydrogène comme vecteur énergétique.



DÉCHETS ÉLECTRONIQUES, UNE MÉTROLOGIE DÉCISIVE POUR LEUR RECYCLAGE

Cobalt, gallium, germanium, indium, lithium... nos téléphones portables, tablettes et autres batteries sont des mines de métaux précieux. Pour des raisons économiques et écologiques, l'Europe encourage leur recyclage. Dans cette perspective, le projet européen EMPIR/MetroCycleEU, coordonné par le LNE, visait à mettre en place une infrastructure métrologique pour déterminer, de façon représentative et traçable au SI, les concentrations de 14 de ces « éléments technologiques critiques » présents dans nos « mines urbaines ».

En collaboration avec ERAMET, les métrologues français ont développé un matériau de référence : une poudre issue du broyage d'éléments de batteries. Comme l'explique Paola Fisicaro,

responsable du pôle de métrologie chimique au LNE, « pour caractériser cet étalon, la méthode de référence est la spectrométrie de masse. Aussi, nous avons mis au point un protocole de mise en solution des rebuts broyés pour les préparer à l'analyse. »

Lors d'une comparaison interlaboratoire, trois matériaux de référence développés par les partenaires du projet ont été qualifiés, ainsi que la méthode primaire et une méthode secondaire par fluorescence X. Ne nécessitant pas de mise en solution des échantillons, cette dernière est plus facile à mettre en œuvre, notamment par les industriels.

Afin d'étalonner leurs instruments de mesure, les industriels disposent désormais de matériaux de référence



LABORATOIRE ICPS ET PRODUCTION DE MATÉRIAUX DE RÉFÉRENCE

caractérisés grâce à MetroCycleEU. Ils leur permettront de mesurer les concentrations de ces éléments critiques avec une incertitude autour de 10%, suffisante pour estimer le bien-fondé d'engager le recyclage de ces déchets électroniques.

LA MÉTROLOGIE MET L'HYDROGÈNE SOUS HAUTE PRESSION

L'hydrogène est une composante essentielle de la décarbonation des transports, de l'industrie ou du gaz de ville. L'ensemble de ces usages nécessite l'établissement d'une métrologie spécifique qui couvre une large gamme de pressions et de températures. C'était l'objectif du projet européen EMPIR/MetHyInfra, auquel le



DÉBITMÉTRIE PRIMAIRE POUR L'HYDROGÈNE À HAUTE PRESSION, AU LNE-LADG

LNE-LADG a participé et dont il a piloté les travaux sur la thématique de mesure de débit de gaz à moyenne pression, jusqu'à 50 bar (5 MPa), avec des fluides alternatifs (air, méthane, azote, hélium).

Les métrologues français ont ainsi établi des protocoles pour la caractérisation dimensionnelle de tuyères soniques, dispositifs utilisés comme étalon secondaire en débitmétrie des gaz à haute pression. Ils ont également étalonné des tuyères soniques avec leurs bancs de référence de débitmétrie, et vérifié le modèle de la mesure en tenant compte des particularités de l'hydrogène. En collaboration avec l'équipementier allemand Maximator, les métrologues ont ensuite utilisé pour la première fois leur étalon secondaire sur une boucle en

hydrogène à 1 000 bar. « L'ensemble des mesures, incluant des comparaisons entre les partenaires du projet MetHyInfra a permis de valider une révision de la norme ISO 9300 sur le mesurage de débit de gaz au moyen d'une tuyère en régime critique », ajoute Rémy Maury, responsable R&D du LNE-LADG.

Par ailleurs, le LNE-LADG a développé deux nouveaux bancs de débitmétrie primaire pour étalonner des tuyères soniques en hydrogène à 30 bar ou des débitmètres cryogéniques. Le premier fonctionne à température ambiante, l'autre à -250 °C pour l'hydrogène liquide selon une méthode laser à effet Doppler. Ce dernier banc sera caractérisé dans le cadre du projet EURAMET/EPM CryoMet, qui débutera en septembre 2025.

SANTÉ ET SÉCURITÉ DES CITOYENS

Santé et sécurité se conjuguent en mode « micro » ou « nano ». Ainsi la surveillance radiologique de l'environnement implique des mesures à des niveaux d'activité extrêmement faibles. En outre, de nouveaux dispositifs de santé mettent en œuvre des techniques microfluidiques. Autant de domaines où les laboratoires de recherche œuvrent pour mettre au point une métrologie adaptée.



PROJET PHARE

GAZ RADIOACTIFS : UN MATÉRIAU POREUX POUR LES SUIVRE À LA TRACE

La détection dans l'environnement de gaz radioactifs émetteurs bêta est coûteuse et peu précise. Une technologie novatrice développée par le LNE-LNHB et l'UCBL pallie ces difficultés et permettra un large déploiement de capteurs pour la surveillance des activités nucléaires.

L'industrie électronucléaire rejette dans l'atmosphère différents gaz radioactifs tels le tritium, le krypton-85 ou le carbone-14. Leur surveillance nécessite des mesures à des niveaux d'activité extrêmement faibles. En outre, ces éléments sont des émetteurs bêta (électrons), difficiles à détecter. En effet, pour ce faire, les moyens mis en œuvre, fondés sur la scintillation de liquides ou les compteurs à gaz, sont coûteux, peu sensibles et incapables de faire la distinction entre différents radionucléides.

Pour y remédier, les chercheurs du LNE-LNHB, de l'Institut Lumière Matière et du laboratoire de chimie de l'École Normale Supérieure de Lyon et de l'Université Claude Bernard Lyon 1, ont développé une méthode innovante dans le cadre du projet SPARTE du programme européen Horizon 2020. Finalisé en décembre 2024, il a permis le développement d'une technologie de détection novatrice fondée sur un aérogel inorganique scintillant. Assortie de moyens d'étalonnage et de mesures primaires uniques au monde, elle constitue une rupture pour la quantification des gaz radioactifs.

Ces développements trouvent leur source dans un projet préliminaire exploratoire de la Métrologie Française en 2017. Les métrologues ont alors eu l'intuition qu'un matériau scintillant poreux, permettant de maximiser la surface de contact entre un gaz et le matériau actif, pouvait être une solution. « *Les résultats n'étaient pas extraordinaires mais nous avons apporté une preuve de concept qui nous a permis d'obtenir un financement pour un projet européen plus ambitieux* », raconte Benoît Sabot, chercheur au LNE-LNHB.

Dans le cadre du projet SPARTE, plusieurs matériaux ont été testés. Néanmoins, dès le début, forts de travaux réalisés au CEA de longue date sur les matériaux scintillants, les scientifiques fondent leurs plus grands espoirs sur un composé inorganique, à même de résoudre le problème d'une adsorption irréversible des gaz radioactifs au sein de la matrice poreuse.

De leur côté, les chercheurs lyonnais maîtrisent la synthèse d'aérogels à partir de solution de nanoparticules et façonnent un matériau scintillant poreux constitué de seulement 15% de solide. Les gaz radioactifs s'y diffusent et l'énergie des électrons émis lors des désintégrations se mue alors en photons visibles.

Afin de relier ces photons à l'activité d'un gaz, les métrologues du LNE-LNHB ont réalisé des prouesses. Tout d'abord, ils ont conçu un instrument de mesure portable qui intègre le scintillateur poreux et des photomultiplicateurs. « *Réalisé par fabrication additive,*



Trois questions à...

BENOÎT SABOT, CHERCHEUR AU LNE-LNHB

Quel est le potentiel de votre nouvelle approche pour la métrologie des gaz radioactifs ?

B.S. : Nous avons travaillé sur le tritium et le krypton-85, mais notre technologie peut s'adapter à tous les gaz radioactifs émetteurs bêta : carbone-14, xénon-133 ou argon-37. Dans le cadre du projet RadonNET nous allons travailler sur le radon. Et, avec le projet SCINTIPLUS, nous allons poursuivre les études métrologiques des scintillateurs pour d'autres paramètres que leur rendement.

Visez-vous la commercialisation de votre détecteur ?

B.S. : Nous avons déposé trois brevets sur notre technologie de détection et sommes actuellement en discussion afin d'effectuer un transfert partiel vers l'industrie. Actuellement, nous nous assurons à la fois de la reproductibilité de fabrication et de la consolidation du matériau scintillant, et aussi du développement de prototypes d'appareil de mesure.

La méthode primaire développée dans le cadre de SPARTE laisse-elle envisager des développements au-delà de la métrologie ?

B.S. : En effet, cette méthode permet d'accéder à des propriétés fondamentales des matériaux scintillants. Avec elle, il est possible d'étudier l'ensemble des matériaux qui produisent de la lumière et leurs paramètres de détection. Récemment, avec nos collègues lyonnais, nous avons étudié le potentiel des nanopérovskites comme scintillateurs liquides, ces matériaux étant en plein développement notamment pour les cellules solaires photovoltaïques.

PROJET PHARE

«NOS RÉSULTATS MONTRENT QUE NOUS POUVONS POTENTIELLEMENT DÉTECTER TOUT TYPE DE GAZ RADIOACTIFS »

BENOÎT SABOT,
CHERCHEUR AU LNE-LNHB

«cet instrument a nécessité un long travail d'optimisation afin d'être à la fois parfaitement étanche et performant en détection », précise le physicien.

En parallèle, l'équipe a développé un banc d'étalonnage pour étalonner leur détecteur avec des gaz radioactifs de concentration connue, étalons donc. Mieux, ils ont imaginé et mis en œuvre une méthode absolue de mesure du rendement du scintillateur couplé au système de détection. Combinant spectroscopie Compton et méthode du Rapport des Coïncidences Triples à Doubles (RCTD), elle permet non seulement d'établir un lien entre la réponse du détecteur et l'activité du gaz radioactif, mais également de caractériser finement les interactions et les transferts d'énergie entre les électrons issus des désintégrations et le matériau scintillant. « Grâce à cette nouvelle méthode primaire, on ne fait plus seulement de la métrologie de l'activité, mais aussi celle du scintillateur », résume Benoît Sabot. Ces développements ont conduit le scientifique et ses collègues à réaliser la première détection en ligne de tritium et de krypton à un niveau d'activité de $1 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ dans l'air en 100 s, soit un niveau plus faible que celui accessible à tout instrument du commerce.

En outre, ils sont parvenus également pour la première fois à discriminer les deux radioéléments et les quantifier en mélange. « Le tritium présente un spectre d'énergie de désintégration de basse



BANC D'ÉTALONNAGE DE DÉTECTEURS DE GAZ RADIOACTIFS AU CEA/LNE-LNHB

énergie, à l'inverse du krypton dont les désintégrations sont dans la partie haute du spectre. Ainsi nos résultats montrent que nous pouvons potentiellement détecter tout type de gaz radioactifs », complète le spécialiste.

S'il est trop tôt pour disposer d'un bilan d'incertitude complet, les mesures réalisées montrent que le détecteur portable développé au LNE-LNHB permet de déterminer des valeurs d'activité avec une incertitude de quelques pourcents. Quant à la méthode primaire, elle permet de caractériser des rendements de scintillation à la précision de quelques pour mille entre 1 keV et 9 keV. La nouvelle approche ouvre la possibilité d'un large déploiement de capteurs pour la surveillance des activités nucléaires civiles, et aussi des applications nucléaires médicales et militaires.



PROTOTYPE DE SCINTILLATEUR EXPOSÉ À UNE LUMIÈRE UV

CHIFFRES CLÉS

Le projet SPARTE est à l'origine de 3 brevets, 4 publications dont 2 dans *Nature Photonics*, 1 publication dans *Advanced Functional Material* et 1 publication dans *Nature Scientific Reports*.

La technologie développée a permis pour la première fois des mesures de l'activité de gaz radioactifs (tritium et krypton-85) de 1 kBq par mètre cube d'air en un temps de 100 s.

MICROFLUIDIQUE : LA MÉTROLOGIE AU SERVICE DE SON UNIFICATION

Les technologies microfluidiques (écoulements dans des capillaires) sont indispensables dans les domaines de la santé, de l'impression 3D ou encore de l'analyse chimique. Mais leur essor est freiné par un manque de compatibilité entre les différents dispositifs, d'homogénéité globale de leurs propriétés et performances ou même du vocabulaire général employé dans la discipline. Y mettre bon ordre était l'objectif du projet européen EMPIR/MFMET, finalisé l'année dernière avec la participation du LNE-CETIAT.

Concrètement, les métrologues ont participé à la rédaction de deux nouvelles normes. La première, ISO 10991, définit précisément un ensemble de termes relatifs à la microfluidique : hydrophilie,

capillarité, volume mort... La seconde, ISO 22916, se rapporte aux caractéristiques techniques des interfaces de ces dispositifs pour garantir leur interopérabilité.

Afin de déterminer les propriétés de ces derniers, les métrologues en débitmétrie liquide ont également participé à la définition de protocoles de mesure traçable au SI. Pour les valider, le LNE-CETIAT a piloté une comparaison à laquelle ont participé l'ensemble des partenaires du projet. Pour ce faire, ces derniers ont spécialement conçu un étalon de transfert. « Il prend la forme d'une puce microfluidique sur laquelle différents micro-canaux sont gravés pour générer diverses configurations d'écoulement », explique Kevin Romieu,

ingénieur d'étude au LNE-CETIAT. Sur cet étalon, les métrologues français ont pour leur part mesuré les débits et les résistances hydrodynamiques. Les résultats ont été publiés sous la forme de guides de bonnes pratiques permettant d'unifier l'univers de la microfluidique.



PUCE ÉTALON DE TRANSFERT DE DÉBIT MICROFLUIDIQUE FABRIQUÉE POUR LE PROJET

DOSIMÉTRIE DE L'ENVIRONNEMENT : LES FAIBLES DOSES DE MIEUX EN MIEUX TRACÉES

Les débits de « dose » utilisés pour étalonner des radiamètres de surveillance radiologique de l'environnement doivent être représentatifs des débits rencontrés sur le terrain. Afin de disposer de telles conditions sans obérer le bilan d'incertitude, un bruit de fond radiatif naturel très faible est nécessaire. Grâce à la nouvelle installation développée par le LNE-LNHB dans le cadre d'un projet de la Métrologie Française, c'est désormais possible.

Cette infrastructure prend la forme d'une enceinte dont le blindage permet de s'affranchir d'une partie des composantes cosmique et tellurique de la radioactivité naturelle.

En parallèle de son assemblage, finalisé l'année dernière, les métrologues ont fabriqué des sources de très faible activité permettant de garantir des débits de « dose » de quelques dizaines de nanosieverts par heure, comparables à ceux de la radioactivité naturelle.



RADIAMÈTRE À L'INTÉRIEUR DE L'ENCEINTE BLINDÉE DÉVELOPPÉE PAR LE LNE-LNHB

Une fois ces sources mises en place dans l'enceinte, les spécialistes ont procédé au raccordement de leurs références. « Pour ce faire, nous avons étaloné une sonde à scintillation sur nos faisceaux de référence, puis nous l'avons installée dans l'enceinte pour y établir les débits de référence de cette installation », détaille Jean-Marc Bordy, directeur de recherche au LNE-LNHB.

La nouvelle installation permet d'envisager l'étalonnage des radiamètres avec une incertitude à partir de 5 à 7% contre 15% auparavant. Après une comparaison internationale dans le courant de l'année, le dossier d'accréditation COFRAC pourra être déposé.

MÉTROLOGIE FONDAMENTALE

La totalité des applications de métrologie repose sur la réalisation des unités du Système international d'unités (SI). Temps, grandeurs électriques, température, données fondamentales nucléaires... les activités de recherche du LNE et du RNMF y contribuent en s'appuyant sur les avancées scientifiques de pointe, faisant des laboratoires des acteurs incontournables de la métrologie mondiale.

PROJET PHARE

LA SECONDE OPTIQUE EN VOIE DE STABILISATION

Incontournable pour l'étalonnage du Temps Atomique International (TAI) au niveau mondial, le LNE-SYRTE l'est tout autant pour préparer la redéfinition en cours de la seconde du SI. Les résultats obtenus en 2024 sur la stabilisation des lasers d'interrogation des horloges optiques à partir de matériaux dopés en terres rares en témoignent.

À l'horizon 2030, l'unité de temps sera redéfinie. Depuis 1967, la seconde est définie à partir d'une fréquence micro-onde de radiation correspondant à une transition de l'atome de césium 133. Et, sous l'égide du CIPM, les laboratoires nationaux de métrologie temps-fréquence travaillent déjà depuis quelques années pour proposer une nouvelle définition et prouver son opérabilité pratique. À terme, la définition sera fondée sur une ou plusieurs transitions atomiques dont les fréquences seront dans le domaine optique, avec à la clé la possibilité de réaliser la seconde avec une exactitude 100 fois meilleure.

Pour permettre cette bascule, il convient de mettre au point une nouvelle génération d'horloges et également toute l'infrastructure périphérique permettant leur mise en œuvre avec des performances ultimes. En particulier, la stabilité et l'incertitude cibles ne seront atteintes qu'à la condition de disposer de lasers suffisamment stables en fréquence pour « interroger » les atomes de ces horloges. Dans ce but, le LNE-SYRTE développe un principe original de stabilisation de ces lasers, fondé sur un laser annexe lui-même stabilisé par spectroscopie d'ions de terres rares. Développer ce laser était l'objet du projet LUSTROM du laboratoire et du projet européen EMPIR/NextLasers. En 2024, les chercheurs français ont ainsi obtenu une stabilité relative de leur laser de 4×10^{-16} sur 1 s, se rapprochant ainsi du niveau de 10^{-17} exigé par les horloges à la limite quantique.

Cette stabilité est essentielle. Une horloge atomique, c'est la mesure d'une fréquence d'émission de ses atomes après les avoir excités avec une radiation laser précise. Or si la fréquence de cette dernière fluctue, la mesure de la fréquence atomique recherchée est bruitée et la résolution de l'horloge est moindre.

Pour stabiliser la fréquence d'un laser, la méthode usuelle est de l'asservir sur une cavité Fabry-Perot de haute finesse. Or, fabriquer une cavité avec la finesse nécessaire pour améliorer les horloges actuelles est techniquement très difficile.

C'est pourquoi, en parallèle de tels travaux menés à l'échelle mondiale, les scientifiques du LNE-SYRTE explorent une méthode spectroscopique prometteuse, où la fréquence du laser d'interrogation pourra être recalée en permanence sur celle d'une transition atomique annexe. Précisément l'étude porte sur une transition d'ions europium enchâssés dans une matrice cristalline de silicate d'yttrium maintenue à une température proche du zéro absolu. « Ces systèmes offrent un temps de cohérence de l'ordre de 1 ms



Trois questions à...

BESS FANG, CHERCHEUSE PHYSICIENNE AU LNE-SYRTE

Comment est née l'activité du LNE-SYRTE sur les ions de terres rares enchâssés dans une matrice cristalline cryogénique pour la stabilisation de lasers d'interrogation d'horloges optiques ?

B.F. : L'activité a démarré en 2012 sous l'impulsion de Yann Le Coq qui a vu tout le potentiel de ces systèmes. Au-delà, notre laboratoire bénéficie d'un avantage géographique pour cette thématique, puisque très proche d'un laboratoire de l'École de Chimie-ParisTech qui est l'un des quelques pôles mondiaux spécialistes de la croissance de cristaux dopés en terres rares. De même, nous travaillons en étroite collaboration avec l'équipe CEDRIC du Cnam à Paris qui nous aide à développer notre système de détection multi-hétérodyne.

D'autres laboratoires dans le monde s'intéressent-ils à ces systèmes ?

B.F. : Historiquement, le potentiel des matériaux dopés de terres rares pour la métrologie du temps a été identifié par une équipe du NIST. Aujourd'hui, deux autres groupes, à l'Université de Lund et à l'Université de Düsseldorf, s'y intéressent, mais sur des aspects non directement reliés à la réalisation de la seconde optique. Sur ce créneau de recherche, nous sommes donc les seuls.

Les matériaux dopés en terres rares vont-ils s'imposer comme solution pour stabiliser les lasers d'interrogation des horloges optiques ?

B.F. : C'est difficile à dire. D'un côté, nos collègues allemands de la PTB et états-uniens du NIST ont obtenu de très bonnes stabilités avec des systèmes plus classiques comme une cavité Fabry-Perot cryogénique ou une cavité longue. D'un autre côté, nous avons clairement identifié des chemins possibles d'amélioration des performances de notre système. Pour l'heure, toutes les solutions prometteuses doivent encore être étudiées et évaluées.

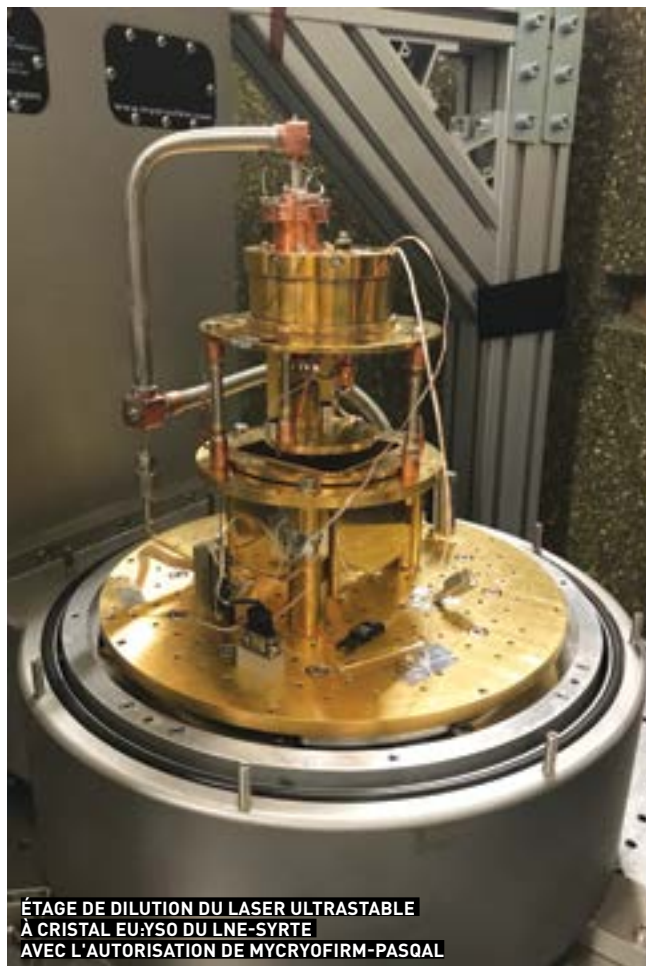
PROJET PHARE

d'où il résulte une largeur de raie très étroite, détaille Bess Fang, chercheuse physicienne au LNE-SYRTE. De plus, une matrice solide est synonyme de forte densité atomique donc d'un rapport signal à bruit favorable. Enfin, il s'agit de systèmes de quelques millimètres de côté, les rendant moins sensibles aux gradients thermiques que les cavités Fabry-Perot dont la longueur est plutôt de 10 cm. »

Fort de résultats préliminaires obtenus par le NIST en 2011, montrant que des systèmes à base de terres rares devaient être très peu sensibles au bruit thermique, les chercheurs du LNE-SYRTE ont débuté leurs recherches sur ce thème dès 2012. Et, partant de zéro, ils ont démontré en 2020 l'atteinte d'une stabilité de $1,7 \times 10^{-15}$, comparable à celle obtenue avec les cavités FP, et l'existence d'un important potentiel d'amélioration.

Pour l'exploiter, ils se sont engagés dans le projet NextLasers, piloté par la PTB (Allemane), en parallèle de leur propre projet LUSTROM. Dans le cadre du premier, une analyse théorique couplée à une série de mesures ont permis de prouver pour la première fois l'extrême faiblesse du bruit thermodynamique au sein de systèmes à ions europium à l'état solide.

Dans le cadre de LUSTROM, les scientifiques ont modifié drastiquement leur expérience : ajout d'un étage à dilution à leur système cryogénique pour atteindre une température de 300 mK dans le cristal, contre 4 K précédemment. De cette manière, non seulement la largeur de la résonance a été réduite, mais sa forme de raie est désormais plus pointue. Par ailleurs, un meilleur contrôle des fluctuations de température s'est traduit par une diminution importante du bruit en fréquence. Puis, une modification profonde du dispositif de mesure et de pilotage de la fréquence du laser, ainsi que sa numérisation, a permis une détection à ultra-bas bruit selon une technique d'inter-férométrie multi-hétérodyne. Comme l'explique la physicienne, « dans un tel schéma de détection, plusieurs fréquences permettent de mesurer le décalage du laser et une autre de mesurer le bruit sur ce décalage, et alors d'y remédier. » À la clé, une stabilité du laser divisée par 4 par rapport à la valeur précédemment publiée.



ÉTAGE DE DILUTION DU LASER ULTRASTABLE À CRISTAL EU:YSO DU LNE-SYRTE AVEC L'AUTORISATION DE MYCRYOFIRM-PASQAL

Pour faire encore mieux, l'équipe a commencé il y a quelques mois le projet MISTERFREES. « Il vise d'une part à réduire encore les vibrations induites par le système cryogénique, d'autre part à étudier et circonscrire une émission lumineuse parasite inattendue », détaille Bess Fang. De quoi définitivement faire des cristaux dopés en ions europium un élément essentiel de la boîte à outils de la redéfinition « optique » de la seconde !

CHIFFRES CLÉS

Afin de tirer tout le parti de l'exactitude des horloges optiques, il est nécessaire d'accroître la stabilité en fréquence des lasers d'interrogation.

En 2017, le LNE-SYRTE a montré que des matériaux dopés en terres rares permettaient d'atteindre une stabilité de 2×10^{-14} . En 2020, cette valeur a été portée à $1,7 \times 10^{-15}$ et enfin à 4×10^{-16} en 2024, s'approchant de la valeur cible de 10^{-17} .

ISOTOPE BOSONIQUE DU MERCURE : UN GAGE DE STABILITÉ POUR LA SECONDE OPTIQUE

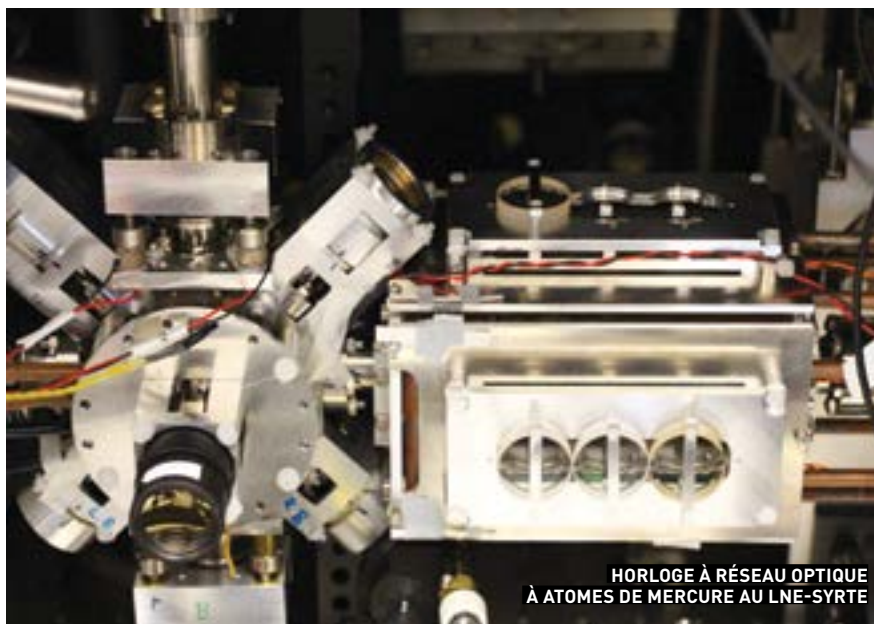
Dans le cadre de la redéfinition de la seconde, escomptée en 2030, plusieurs transitions atomiques sont prometteuses pour la réalisation d'horloges optiques. De leur côté, les chercheurs du LNE-SYRTE étudient l'atome de mercure depuis plusieurs années. Dans le cadre d'un projet finalisé en 2024, ils ont réalisé la première observation de la transition dans un de ses isotopes bosoniques et montré tout son potentiel d'horloge.

D'une façon générale, le mercure a l'intérêt d'être très peu sensible aux effets du rayonnement thermique. Néanmoins avec l'isotope fermionique étudié auparavant par les métrologues, l'émission spontanée associée à la transition ciblée limitait le temps d'interrogation de l'horloge.

Le recours à un isotope bosonique immunise donc contre cette limitation, même si en contrepartie l'excitation de la transition d'horloge nécessite l'emploi d'un champ magnétique et d'une intensité laser plus forts.

« Partant de zéro, nous avons dans un premier temps trouvé la transition et étudié sa sensibilité à l'intensité du champ magnétique et à celle du laser d'interrogation », commente Sébastien Bize, directeur de recherche au LNE-SYRTE.

Les physiciens ont ainsi démontré son potentiel en matière d'exactitude, de robustesse et de stabilité, en faisant fonctionner une horloge à réseau avec une stabilité meilleure que 10^{-15} sur 1 s, qui n'est que la première étape.



HORLOGE À RÉSEAU OPTIQUE
À ATOMES DE MERCURE AU LNE-SYRTE

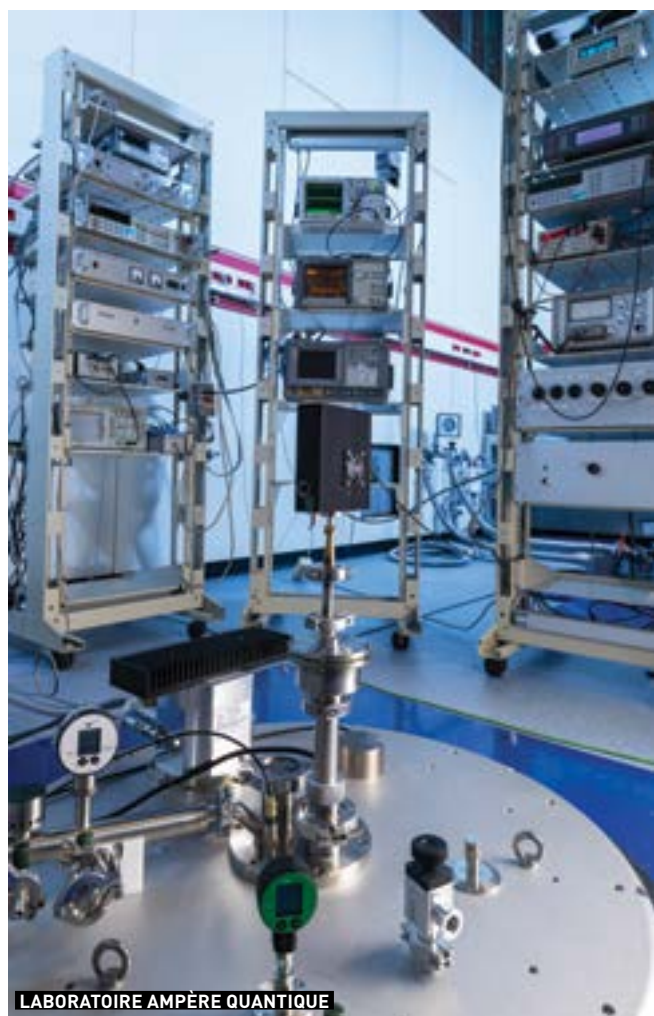
Les scientifiques poursuivent ces recherches dans le cadre d'un nouveau projet et visent désormais une exactitude de 10^{-18} , au niveau des meilleures horloges optiques actuelles. L'ensemble de ces résultats et perspectives placent le mercure parmi les éléments clés pour définir la seconde optique, et réaffirment la place du LNE-SYRTE parmi les principaux acteurs pour cet objectif.

« LES CHERCHEURS DU LNE-SYRTE
ONT RÉALISÉ LA PREMIÈRE
OBSERVATION DE LA TRANSITION
DANS UN DES ISOTOPES BOSONIQUES
DU MERCURE »

ÉTALON QUANTIQUE DE COURANT ÉLECTRIQUE : UNE INCERTITUDE RECORD !

La nouvelle définition de l'ampère adoptée en 2018, fondée sur des constantes de la physique, a ouvert la voie à la réalisation d'étalons de courant qui exploitent des phénomènes quantiques. En 2016, le LNE a proposé un tel étalon fondé sur l'application de la loi d'Ohm à des étalons quantiques de tension et de résistance. Aux termes du projet AMPERE-1, finalisé l'année dernière, le laboratoire français devient le seul au monde à proposer un étalon primaire qui réalise l'ampère dans une gamme étendue d'intensités et avec une incertitude relative de 10^{-8} .

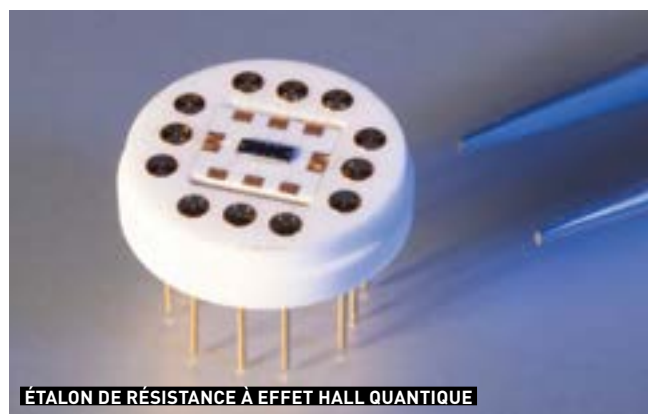
« LE LNE DEVIENT LE SEUL LABORATOIRE AU MONDE À PROPOSER UN ÉTALON PRIMAIRE QUI RÉALISE L'AMPÈRE DANS UNE GAMME ÉTENDUE D'INTENSITÉS ET AVEC UNE INCERTITUDE RELATIVE DE 10^{-8} . »



LABORATOIRE AMPÈRE QUANTIQUE

Cet exploit est le fruit d'une dizaine d'années de développements instrumentaux et de la mise en place d'un laboratoire spécialement aménagé. Concrètement, les métrologues du LNE ont mis au point un dispositif qui intègre un étalon de résistance et un étalon de tension qui exploitent respectivement l'effet Hall quantique et l'effet Josephson, permettant de réaliser l'ampère à partir de la constante de Planck et de la charge élémentaire. À quoi s'ajoute un amplificateur qui, par le jeu subtil d'effets quantiques au niveau des connexions entre les différents éléments, permet d'amplifier le courant quantifié sans erreur.

À la clé : « Nous réalisons l'unité de courant avec une incertitude relative de 10^{-8} , avec un potentiel d'amélioration d'un facteur 10 dans un futur proche », commente Sophie Djordjevic, chercheuse au LNE. Mieux, cette incertitude record couvre des intensités qui s'étendent du μA au mA , et là encore, atteindre des intensités plus faibles est possible. Cette nouvelle instrumentation mise en œuvre au LNE jette les bases d'une infrastructure unique au monde pour une réalisation versatile de l'ensemble des étalons électriques.



ÉTALON DE RÉSISTANCE À EFFET HALL QUANTIQUE

ÉTALON CALCULABLE DE CAPACITÉ : SES PERFORMANCES DÉMONTRÉES

En 2021, le LNE inaugurerait son nouvel étalon de capacité calculable de Thompson-Lampard (TLCC), conçu pour réaliser le farad, unité SI de capacité électrique, avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-8} . Depuis, les développements autour de cet instrument unique au monde se sont poursuivis, confirmant son très haut niveau de performances.

Pour ce faire, les métrologues du LNE ont notamment développé l'année dernière une simulation par éléments finis de leur « Lampard », surtout de l'effet de ses imperfections mécaniques. « Cela nous a permis de confirmer l'amélioration d'un facteur 4 de l'incertitude d'étalonnage d'une capacité de 1 pF par rapport à la version précédente de l'installation », se félicite Almazbek Imanaliev, chercheur au LNE. Preuve de l'intérêt suscité par le « code » proposé, celui-ci a été adopté par le BIPM qui l'utilisera désormais pour corriger *a posteriori* l'effet des défauts de son propre étalon calculable.

Par ailleurs, les chercheurs ont mis au point un pont de mesure d'impédance entièrement automatisé qui, associé au TLCC, permet de déterminer la capacité inconnue d'un condensateur par rapport à celle, étalon, fournie par le TLCC et d'une tension étalon. Ayant une excellente stabilité, ce système prend le relais du pont manuel dont la mise en œuvre était chronophage et ne mettait jamais à l'abri d'une erreur humaine.

Cette année, le LNE participera à la comparaison clé de capacités EURAMET.EM-K4, avec une incertitude relative de mesure inférieure à 5×10^{-8} , devenant ainsi l'un des premiers laboratoires aptes à réaliser le farad selon les deux voies (la seconde étant fondée sur l'effet Hall quantique) recommandées par le CIPM dans l'annexe 2 du SI.

« PREUVE DE L'INTÉRÊT
SUSCITÉ PAR LE « CODE »
PROPOSÉ, CELUI-CI A
ÉTÉ ADOPTÉ PAR LE BIPM
QUI L'UTILISERA DÉSORMAIS
POUR CORRIGER
A POSTERIORI L'EFFET DES
DÉFAUTS DE SON PROPRE
ÉTALON CALCULABLE. »



ÉTALON CALCULABLE DE CAPACITÉ DE THOMPSON-LAMPARD

KELVIN : DES RÉFÉRENCES DE TEMPÉRATURE THERMODYNAMIQUE DE PLUS EN PLUS CHAUDES



La mise en pratique de la définition du kelvin de 2018 repose sur la réalisation de points fixes de référence de températures reproductibles. Au cours des 15 dernières années, le LNE-CNAM s'est engagé dans de nombreux projets internationaux ou nationaux visant à améliorer la mise en pratique du kelvin à haute température, au-delà de 1 360 K environ.

Le dernier projet en date a été finalisé en 2024. Il a permis d'affecter des valeurs de température thermodynamique à des points fixes pris comme référence, conformément à la définition du kelvin de 2018. Ces points fixes complètent ainsi ceux de l'échelle internationale de température, l'EIT-90, en limitant l'incertitude d'extrapolation au-delà de son plus haut point fixe.

Aux plus hautes températures, les points fixes sont matérialisés par des transitions de phase de métaux purs ou d'alliages métal-carbone. Les travaux des chercheurs ont abouti précisément à la détermination de la température thermodynamique de 8 nouveaux points fixes, jusqu'à la transition péritectique du carbure de tungstène-carbone à 3 021 K. « Pour ce faire, nous avons développé une méthode radiométrique fondée sur une mesure absolue de la luminance, permettant de déduire la température thermodynamique à partir de la loi de Planck », explicite Frédéric Bourson, ingénieur de recherche au LNE-CNAM.

Point d'orgue de ces développements, le laboratoire a participé à une comparaison internationale qui visait à comparer les échelles de température de laboratoires nationaux de métrologie, entre 1 200 K et 3 200 K. Aux côtés des laboratoires japonais et chinois, les résultats du LNE-CNAM le placent parmi les trois leaders mondiaux pour la réalisation du kelvin aux plus hautes températures.

« NOUS AVONS DÉTERMINÉ LA TEMPÉRATURE THERMODYNAMIQUE DE 8 POINTS FIXES DE TEMPÉRATURE JUSQU'À 3 021 K. »

DÉSINTÉGRATIONS BÊTA : LES TRANSITIONS INTERDITES SOUS L'ŒIL DES MÉTROLOGUES

Physique fondamentale, filière électro-nucléaire, médecine... de nombreuses applications nécessitent des données précises de désintégrations radioactives. Afin de combler les lacunes concernant les transitions dites bêta, le LNE-LNHB mène depuis plusieurs années un important programme de recherche théorique et expérimentale dont le dernier volet en date s'est achevé en 2024.

Les métrologues ont ainsi proposé un formalisme pour décrire ces transitions qui impliquent la capture ou l'émission d'un électron. Plus précisément, leurs derniers

développements concernent la description fine des transitions interdites non uniques. « Pour ce faire, nous avons intégré un formalisme de l'interaction faible, des éléments de physique atomique et des modèles de structure nucléaire dans un code de calcul d'une portée très générale », détaille Xavier Mougeot, chercheur au LNE-LNHB.

En outre, le projet incluait des mesures de spectres d'émission sur une large plage d'énergie, qui ont permis de s'assurer de la validité de la modélisation et d'associer des incertitudes aux calculs.

Reconnaissant la fiabilité et les performances de ce formalisme, les deux projets de collaboration internationale visant à évaluer des données nucléaires de décroissance, le DDEP coordonné par le LNE-LNHB et le NSDD-ENSDF piloté par l'AIEA, ont adopté officiellement le code de calcul du LNE-LNHB pour leurs recommandations.

De leur côté, les chercheurs français poursuivent leurs travaux en vue de mieux connaître les paramètres fondamentaux associés à l'interaction nucléaire faible à l'origine de la radioactivité.



THÈSES DE DOCTORAT SOUTENUES EN 2024

LNE

Isabel Bastardo-Fernandez

7 mars 2024

"Towards improved reliability in the determination of TiO₂ (nano) particles by single particle inductively coupled plasma - mass spectrometry: application to food characterisation and migration studies"

École nationale vétérinaire d'Alfort (Maisons-Alfort), ED 581 ABIES / Chimie

Rita Nohra

15 mars 2024

"Modeling of the reaction to fire of materials in under-ventilated spaces. Application on the PMMA"

ISAE-ENSMA (Poitiers), ED MIMME / Énergétique, thermique et combustion

Damien Richert

8 juillet 2024

"Metrology of scanning microwave microscopy applied to transport measurement for semiconductors"

Université de Lyon / INSA de Lyon, ED 160 EEA / Microélectronique, micro et nanotechnologies

Gaëlle Capitaine

13 septembre 2024

"Establish the metrological traceability of seawater acidification measurements"

Aix Marseille Université (Marseille), ED 251 Sciences de l'environnement / Océanographie

Fatima Becher

21 octobre 2024

« Conception d'une sonde pour la mesure de puissance moyenne dans la bande de fréquence 110 GHz - 170 GHz »

Université Paris-Saclay (Palaiseau), ED 575 EOBE / Génie électrique

LNE-IRSN

Ronan Lelievre

26 novembre 2024

« Caractérisation des émissions de neutrons produites par lasers »
Institut polytechnique de Paris, Physique

LNE-LNHB

Dilan Tüzün

22 février 2024

"Development of uniform surface sources by functionalization for decommissioning"

Université Paris-Saclay (Saclay), ED 576 PHENIICS / Sciences de l'aval du cycle nucléaire, de la radioprotection et de la radiochimie

Mostafa Lokman Zahir

8 novembre 2024

« Nouvelles références en énergie X et gamma inférieures à 100 keV établies à l'aide de calorimètres magnétiques ultra haute résolution »

Université Paris-Saclay (Saclay), ED 576 PHENIICS / Physique nucléaire

LNE-LTFB

Shambo Mukherjee

10 juillet 2024

« Réalisation d'un interféromètre optique de Fabry-Pérot à faibles sensibilités thermique et accélérométrique »

Université Bourgogne - Franche-Comté (Besançon), ED 37 SPIM / Sciences pour l'ingénieur

Merieme Ouhabaz

16 juillet 2024

« Les niobates et tantalates alcalins pour des dispositifs électroactifs »

Université Bourgogne - Franche-Comté (Besançon), ED 37 SPIM / Matériaux

Sondes Boujnah

3 octobre 2024

« Couches minces de LiNbO₃, déposées par DLI-CVD, pour les composants BAW à haute fréquence »

Université Bourgogne - Franche-Comté (Besançon), ED 37 SPIM / Matériaux

Léa La Spina

6 novembre 2024

« Ondes élastiques guidées hautes fréquences dans des films minces de niobate de lithium sur saphir »
Université Bourgogne - Franche-Comté (Besançon), ED 37 SPIM / Microtechniques

LNE-SYRTE

Yann Balland

11 avril 2024

« Mesure des interactions atomes-surface avec un capteur quantique à atomes froids »

Sorbonne Université, Paris, ED 564 PIF / Physique

Xiuji Lin

12 avril 2024

"Ultra-stable laser with spectral hole burning and multi-channel probing"

Université Paris Sciences et Lettres (PSL, Paris), ED 564 PIF / Physique

Yu-Ting Cheng

13 mai 2024

« Études géophysiques des séries de paramètres de rotation de la Terre estimées par les observations GNSS »
Université Paris Sciences et Lettres (PSL, Paris), ED 564 PIF / Physique

Jordan Gué

1^{er} octobre 2024

"Exploration of new experimental strategies for the detection of ultralight dark matter: laboratory searches on ground and in space"
Observatoire de Paris - PSL, ED 127 AAIF / Astrophysique

Maxime Pesche

6 décembre 2024

« Atteindre le nano-g avec un gravimètre absolu à atomes froids »
Sorbonne Université (Paris), Physique

Clara Zyskind

16 décembre 2024

"An optical lattice clock with a bosonic isotope of mercury"
Sorbonne Université (Paris), Physique

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES (HDR) OBTENUE EN 2024

LNE-SYRTE

Jérôme Lodewyck

10 décembre 2024

« Horloges à réseau optique au strontium pour une redéfinition de la seconde du SI »
Observatoire de Paris, Physique

Siège : 1, rue Gaston Boissier - 75724 Paris Cedex 15 - Tél. : 01 40 43 37 00
lne.fr - metrologie-francaise@lne.fr - info@lne.fr

👉 Suivez-nous sur les réseaux sociaux :   

Rédaction : Mathieu Grousson / LNE - Réalisation : Esquif Communication - Mars 2025

Crédits photos : Philippe Stroppa : p. 3, 8, 10, 11, 12, 15, 22, 29, 30, 34, 38, 39 - LNE : p. 13, 14, 16, 17, 26, 33 - Istock : p. 20, 24 - François Piquemal : p. 21 - Daniel Truong : p. 23 - Next : p. 25 - LNE-CNAM : p. 27, 40 - Adobe Stock : p. 28 - Cesame Exadebit : p. 29 - Benoît Sabot : p. 31 - Frédéric Chaput : p. 32 - Kevin Romieu : p. 33 - Bess Fang : p. 35 - LNE-SYRTE : p. 36 - Floriane Sparma : p. 37 - Xavier Mougeot : p. 41

Imprimé par Handiprint, entreprise adaptée, sur du papier issu de forêts gérées durablement

