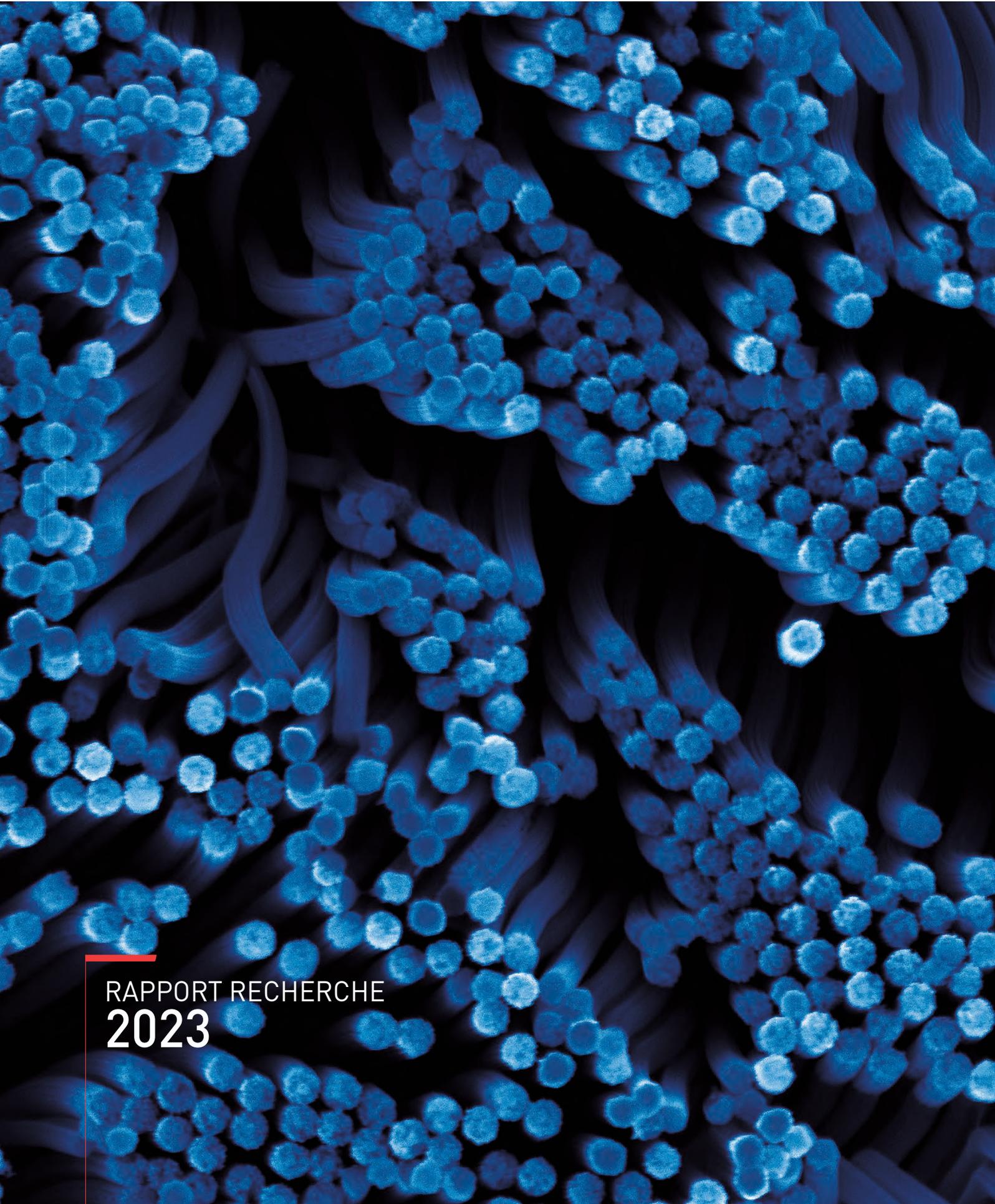




RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

LABORATOIRE
NATIONAL
DE MÉTROLOGIE
ET D'ESSAIS



RAPPORT RECHERCHE
2023

EDITORIAL



« LA RECHERCHE EST UN DES PILIERS DE L'ACTIVITÉ DU LNE. DE FAIT, ELLE EST INDISPENSABLE À L'INNOVATION ET AU DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL ET ÉCONOMIQUE. »

THOMAS GRENON,
DIRECTEUR GÉNÉRAL

Dans un contexte de crises multiples, je suis heureux et fier de constater que le LNE a su relever les défis qui se sont présentés à lui l'année passée. Le nombre d'articles scientifiques publiés en 2023 par les chercheurs de notre laboratoire, 102, bien au-delà des 80 qui étaient notre objectif, résume à lui seul le dynamisme de la recherche au sein de nos équipes.

Les laboratoires du Réseau national de la métrologie française (RNMF) peuvent par ailleurs se féliciter de s'être vus confier l'année dernière la coordination de 8 nouveaux projets européens de recherche en métrologie, ce qui constitue pour nous un record. Ce chiffre démontre la qualité de nos équipes et de nos propositions. Il reflète aussi l'opportunité de faire émerger de jeunes chercheuses et chercheurs dans des domaines très variés : thermométrie primaire, diagnostics médicaux, débitmétrie de l'hydrogène... ce qui constitue une grande source de satisfaction.

Nous sommes également très satisfaits des résultats des évaluations, certes préliminaires à ce jour, menées l'année dernière par l'Hcéres auprès du LNE-CNAM et du LNE-SYRTE, deux laboratoires du RNMF qualifiés de « pépites ».

La recherche est un des piliers de l'activité du LNE. De fait, elle est indispensable à l'innovation et au développement industriel et économique. Plusieurs projets l'ont illustré en 2023.

C'est d'abord le démarrage du Plan national quantique qui vise à faire émerger l'industrie quantique de demain. Dans ce but, la métrologie a un important rôle à jouer. Ainsi, le LNE a poursuivi l'année passée la mise en place de sa plateforme de

caractérisation pour les matériaux et les systèmes quantiques. 2023 a également vu le démarrage du projet BACQ qui vise à établir des références pour évaluer les performances de calculateurs quantiques. Financé dans le cadre du programme MetriQs-France, coordonné par le LNE, il sera bientôt suivi d'autres projets.

C'est aussi l'envol de l'association NanoMeasureFrance qui aide les industriels à améliorer la traçabilité pour les mesures de caractérisation des nanomatériaux et à renforcer la confiance dans leurs produits. Une quarantaine de sociétés ont adhéré et nous avons déjà organisé plusieurs événements.

Je souhaiterais également noter l'implication de nos scientifiques dans les *Testing & Experimentation Facilities* (TEF) mis en place par la Commission européenne pour soutenir le déploiement d'une IA souveraine et éthique dans les domaines de la ville intelligente, de la santé et de l'agroalimentaire. Leurs travaux ont démarré l'année dernière. Enfin, en 2023, le Groupement d'intérêt scientifique du LCSQA, le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air, a été prolongé pour 10 ans. Les résultats de ses mesures peuvent avoir un impact économique et sociétale considérable. Le LNE est le garant de leur traçabilité.

Pour finir, je voudrais saluer Bruno Hay, responsable du pôle Photonique-Énergétique, lauréat 2023 du Prix LNE de la recherche pour ses travaux sur les propriétés thermiques des matériaux. Il incarne l'exigence d'une recherche au plus haut niveau orientée vers les besoins des industriels et les applications. Ce que doit être la recherche en métrologie.

SOMMAIRE

- Éditorial 3
- Carte d'identité du LNE et du Réseau national de la métrologie française 6
- Stratégie nationale quantique : le LNE résolument à la manœuvre avec BACQ 8
- Le kelvin quantique : nouveaux étalons et thermomètres en ligne de mire 10
- Prix LNE de la Recherche 2023 13
- Laboratoire de métrologie de la dose : les effets des rayonnements ionisants sous contrôle 14
- La métrologie reçue à l'Académie des Technologies 16
- Fête de la Science : la métrologie meilleure alliée contre le gaspillage énergétique 17



COMPÉTITIVITÉ INDUSTRIELLE

- L'évaluation des robots à base d'IA, accélérateur de la filière robotique 19
- Graphène : mieux le caractériser pour accélérer l'innovation 21
- La précision de la mesure géodésique désormais en deçà du millimètre 21
- Étalonnage des impédances électriques : un système plus complet, simplifié et plus rapide 22
- Caractérisation des luminaires à LED, bientôt une traçabilité métrologique adaptée et normalisée 22
- La parole à... Valérie Lourenço (LNE-LNHB) et Laurent Cronimus (ANDRA) 23



TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

- Des nanofils pour récupérer de l'énergie : vers une métrologie adaptée 25
- Cellules PV : une métrologie adaptée à toutes les situations d'illumination 26
- Teneur en eau de la biomasse : un paramètre critique de son pouvoir calorifique 26
- Métrologie de l'hydrogène pour accélérer la décarbonation des transports lourds 27
- Essais en haute tension : des normes pour fiabiliser les réseaux électriques 27
- La parole à... Thierry Micand (VETTINER) 29



SANTÉ ET SÉCURITÉ DES CITOYENS

- Mesures infrasonores : leur traçabilité au SI assurée jusqu'à 10 mHz 31
- Accélérateurs médicaux : la caractérisation précise de leur niveau d'activation rend possible leur démantèlement 33
- Métrologie chimique adaptée aux COV pertinents pour le suivi du climat 33
- Émissions polluantes des véhicules : traçabilité au SI des essais sur route 34
- La parole à... Guillaume Lemahieu (MICROTRAC) 35



MÉTROLOGIE FONDAMENTALE

- Graphite pyrolytique : un atout pour mesurer la puissance d'un faisceau laser 37
- Schémas de désintégration des radio-nucléides : une plateforme pour les affiner 39
- Étalon quantique de résistance électrique en graphène : fiabilité et facilité de mise en œuvre 39
- Approbation de UTC "continu" pour l'échelle de temps de référence lors de la Conférence mondiale des radiocommunications de 2023 40
- Mesure d'humidité dans les solides, désormais traçable au SI 41

THÈSES DE DOCTORAT SOUTENUES EN 2023 42

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES (HDR) OBTENUE EN 2023 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 2023

25 %
du budget global du LNE

130
docteurs et ingénieurs

19
doctorants

102
publications dans des revues
à comités de lecture

Un portefeuille
de **18** brevets

LA RECHERCHE DU RNMF EN 2023

Plus de **290** scientifiques

166
projets de recherche
dont **46** JRP
(EURAMET Joint Research Projects)

161
publications dans des revues
à comités de lecture

+ de **290** communications
à des conférences

70
thèses de doctorat en préparation
dont **18** soutenues et **1** HDR obtenue

LE RÉSEAU NATIONAL DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE (RNMF)

LNE-CNAM

Le laboratoire commun de métrologie 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 de la longueur et des grandeurs dimensionnelles, des rayonnements optiques, de la température et des grandeurs thermiques, de la masse et des grandeurs apparentées (pression, force, couple, acoustique, accélérométrie, viscosité).

LNE

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

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 dosimétrie et la mesure 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.

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-IRSN

Le laboratoire de métrologie et de dosimétrie des neutrons (LMDN) de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, à Cadarache, est en charge des références nationales pour la dosimétrie des neutrons.

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 l'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-TRAPIL

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

STRATÉGIE NATIONALE QUANTIQUE : LE LNE RÉSOUMENT À LA MANOEUVRE AVEC BACQ

PIÈCE MAÎTRESSE DE LA STRATÉGIE NATIONALE QUANTIQUE, LE LNE PILOTE LE PROGRAMME METRIQS-FRANCE D'ÉVALUATION DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES. IL EST ENTRÉ CETTE ANNÉE EN PHASE OPÉRATIONNELLE AVEC LE LANCEMENT DU PROJET BACQ QUI VISE À ÉTABLIR DES RÉFÉRENCES POUR ÉVALUER LES PERFORMANCES DE CALCULATEURS QUANTIQUES.



RÉUNION DE LANCEMENT DU PROJET BACQ
LE 13 SEPTEMBRE 2023.

Tout le consortium était présent, ainsi que le comité consultatif et stratégique du projet, plusieurs fournisseurs de technologies, nos partenaires pour la normalisation, et nos collaborateurs européens, se remémorant Félicien Schopfer, au LNE, en évoquant le séminaire de démarrage officiel du projet BACQ, le 13 septembre dernier. La journée a été très riche, très marquante et a véritablement contribué à souder le consortium. »

BACQ ? Ce projet, auquel participent Thales, Eviden, le CEA, le CNRS, Teratec et le LNE, vise à établir des références – ou benchmarks – pour évaluer les performances de calculateurs quantiques sous l'angle des applications concrètes, c'est-à-dire qui fassent sens pour les utilisateurs finaux. Premier projet financé dans le cadre du programme MetriQs-France, coordonné par le LNE, son lancement signe le début de la phase opérationnelle de l'implication du laboratoire dans la mise en œuvre de la Stratégie nationale quantique.

Dotée d'un milliard d'euros d'investissement public, cette dernière a pour

ambition de placer la France en tête de la compétition internationale dans l'utilisation des technologies quantiques. Dans ce cadre, MetriQs-France est un élément clé : «son objectif est de mettre en place des référentiels de mesure pour l'évaluation de ces technologies émergentes, ce qui est une étape importante pour leur industrialisation future», explique Félicien Schopfer, responsable de MetriQs-France.

Ainsi, concrètement, BACQ a pour mission de fournir des indicateurs opérationnels de haut niveau permettant de noter les performances des ordinateurs quantiques. Ces indicateurs seront fondés sur l'agrégation de métriques techniques, à la fois sur les plans calculatoire et énergétique, relatives à la résolution de problèmes concrets couvrant de nombreux domaines d'application : optimisation, résolution de systèmes linéaires, simulation de physique et factorisation. BACQ fournira *in fine* les codes informatiques pour les tests de référence à implémenter sur différents types de calculateurs quantiques, la liste des métriques à mesurer,

et le modèle de notation à partir de ces métriques.

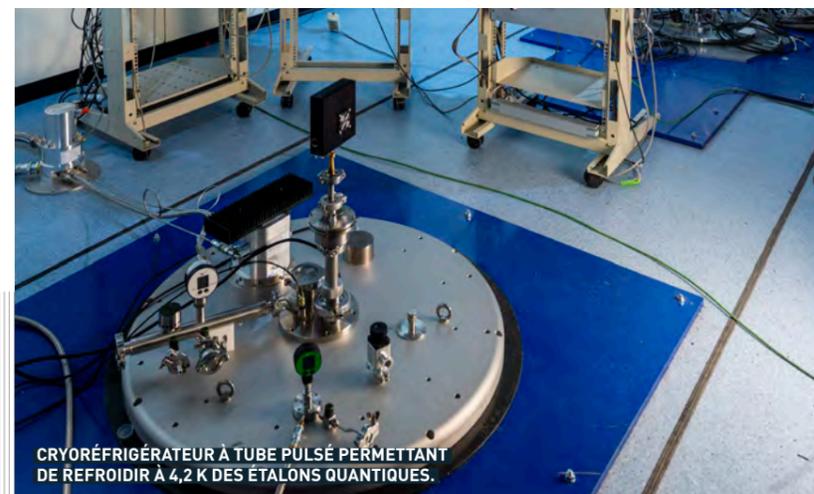
Si le projet a officiellement démarré en septembre dernier, les chercheurs ont débuté leurs investigations dès février 2023 avec un travail sur le benchmark Q-score. Proposé par Eviden, il permet de mesurer les performances de processeurs quantiques pour la résolution du problème d'optimisation Max-Cut, similaire au célèbre problème du «voyageur de commerce». «Q-score sera une des composantes du jeu de benchmarks que nous visons, détaille le physicien. En l'occurrence, il s'agissait d'étendre son utilisation, d'abord pensée pour des calculateurs à portes, à d'autres machines quantiques.» Qubits photoniques de la start-up Quandela, processeurs à atomes neutres de Pasqal, qubits supraconducteurs de la consœur finlandaise IQM ou encore ions piégés du britanno-américain Quantinuum, les partenaires du projet ont ainsi pu avoir accès à plusieurs émulateurs ou processeurs quantiques. Le scientifique ajoute : «pendant trois ans, l'enjeu est de développer des benchmarks pour chacun des problèmes sélectionnés, puis de définir le modèle agrégé multicritère à partir duquel il sera possible de comparer entre eux différents types de processeurs quantiques et de mettre en évidence les atouts de chacune des technos pour une application donnée.» Signe tangible que BACQ est désormais avancé, un premier article de fond détaillant les premiers résultats est prêt pour publication. «C'est une première étape importante qui va permettre de montrer l'assise scientifique du projet», commente Félicien Schopfer.

Au-delà, le projet s'est déjà bien inséré



dans l'écosystème mondial engagé dans la course aux technologies quantiques. Le Séminaire TQCI (*Teratec Quantum Computing Initiative*), organisé le 11 mai dernier à Palaiseau par Teratec, Thales et le LNE y a largement participé. Réunissant l'ensemble des acteurs mondiaux du domaine : spécialistes de benchmarks, fournisseurs de technologies et industriels utilisateurs, pilotes de programmes quantiques, il s'agissait d'échanger autour des différentes initiatives de benchmarking applicatif des calculateurs quantiques. Précisément, le matin a vu la présentation de l'initiative française en la matière, avant les discussions et échanges autour de la présentation des stratégies européennes et internationales. «Cet événement nous a permis de nous rendre visibles, observe le responsable. Nous avons défini la scène et montré que nous étions des acteurs incontournables.» Avec notamment à la clé une prise de contact avec des collègues allemands et hollandais, probable prélude à des collaborations bilatérales ou trilatérales qui se mueront peut-être à terme en programmes européens conjoints. Car telle est l'ambition affichée des partenaires de BACQ et au-delà de MetriQs-France : parvenir à un consensus et faire adopter à grande échelle les outils de mesure en cours d'élaboration, seule

façon de garantir à terme la pénétration la plus large possible des technologies quantiques auprès de leurs utilisateurs potentiels. Dans ce but, à noter également, sous l'impulsion de MetriQs-France et avec le soutien de l'AFNOR, la participation française consécutive au sein du tout nouveau Comité technique de normalisation sur les technologies quantiques, lancé en 2023, sous l'égide des organismes de normalisation européens CEN et CENELEC. «Nous y pilotons un groupe de travail sur le calcul et la simulation quantiques, ainsi qu'un projet sur les benchmarks applicatifs directement lié à BACQ, et un autre sur l'hybridation entre le calcul quantique et le calcul haute performance. Nous participons également au groupe de travail sur les capteurs, la métrologie quantique et les technologies habilitantes, détaille le spécialiste qui ajoute : On est en plein virage. Plusieurs décennies de développement de nos étalons quantiques ont donné au LNE une légitimité et une crédibilité qui nous permet maintenant de mettre notre savoir-faire en matière de métrologie, d'essai de certification, d'accompagnement à la normalisation et à la réglementation au service de l'essor des technologies quantiques. C'est cohérent !» À l'image des forces en présence au sein de BACQ, qui toutes travaillent désormais de concert.



CRYORÉFRIGÉRATEUR À TUBE PULSÉ PERMETTANT DE REFOIDIR À 4,2 K DES ÉTALONS QUANTIQUES.

METRIQS-HUB-FRANCE : UNE PLATEFORME DE MÉTROLOGIE QUANTIQUE AU SEIN DU RNMF

MetriQs-France coordonne le déploiement de cette plateforme au sein du RNMF. À disposition des utilisateurs du secteur public ou industriel, elle proposera à terme des moyens de caractérisation de qubits à l'état solide et de leurs technologies habilitantes (électronique quantique) au LNE, mais également des références de thermométrie à très basse température et de photonique au LNE-Cnam, ainsi que d'évaluation d'horloges atomiques et de gravimètres atomiques au LNE-SYRTE (manipulation d'atomes froids et lasers ultra-stables). Au-delà, ce déploiement verra la mise en réseau d'autres plateformes de caractérisation qui se partageront les bonnes pratiques établies dans le cadre du programme MetriQs-France. Par ailleurs, lancé l'année dernière sous l'égide de l'initiative européenne Quantum Flagship du programme Horizon Europe, le projet Qu-Test ambitionne de déployer une infrastructure d'expérimentation des technologies quantiques à l'échelle du continent. Aux côtés de 12 autres partenaires, laboratoires nationaux de métrologie et organismes de recherche technologique, le RNMF y participe pour la partie temps-fréquence et gravimétrie (LNE-SYRTE), pour la caractérisation des qubits (LNE) et pour les technologies habilitantes. La validation de ces services impliquera la mise en œuvre de cas d'usage proposés par des entreprises partenaires. Pour le cas d'usage qui concerne le LNE, il s'agit de CryoConcept et de la start-up Alice & Bob, acteurs clés de la Stratégie nationale quantique.

LE KELVIN QUANTIQUE : NOUVEAUX ÉTALONS ET THERMOMÈTRES EN LIGNE DE MIRE

DES CAPTEURS OPTOMÉCANIQUES MICROSCOPIQUES PERMETTENT DES MESURES ABSOLUES DE TEMPÉRATURE. SEUL LABORATOIRE NATIONAL DE MÉTROLOGIE EUROPÉEN À EN MAÎTRISER L'USAGE, LE LNE-CNAM ENTEND FAIRE DE CES DISPOSITIFS UN OUTIL AU SERVICE DE L'ESSOR DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES.

En 2018, l'unité de température, le kelvin, de même que trois autres unités du Système international d'unités (SI), a vu sa définition modifiée. Précédemment, le kelvin était défini comme une fraction de la température du point triple de l'eau, c'est-à-dire en référence à un étalon matériel. Désormais, le kelvin est fondé sur la définition thermodynamique de la température, soit en rapport avec l'agitation thermique des atomes du corps, indépendante de la nature chimique de ses constituants, laquelle est reliée à la température de ce corps par la constante de Boltzmann dont la valeur numérique est désormais fixée par le SI.

Afin de mettre en pratique cette nouvelle définition entrée en vigueur en mai 2019 et d'assurer la traçabilité métrologique de tous les types de mesure, le laboratoire de thermométrie du LNE-Cnam travaille activement à la mise en cohérence des échelles de température toujours utilisées dans la pratique courante et au développement de nouveaux moyens de mesure absolue.

Pour mesurer les températures cryogéniques, le laboratoire s'est ainsi fait une spécialité des techniques quantiques. Adaptées aux mesures à l'échelle du micromètre, elles accompagneront l'essor des technologies quantiques tout en offrant la possibilité de disposer de thermomètres auto-étalonnés.

UN THERMOMÈTRE À CRISTAL PHOTO-PHONONIQUE

Plusieurs solutions s'offrent aux métrologues pour mesurer la température telle que nouvellement définie. Et le LNE-Cnam en développe plusieurs, adaptées à différentes applications et gammes de température. L'une d'elles consiste à

utiliser un cristal photo-phononique pour concevoir un thermomètre. Cette structure nano-fabriquée est caractérisée par une variation périodique de ses propriétés optiques et élastiques, formant à la fois un résonateur mécanique et une cavité optique, couplés par interaction optomécanique. Ainsi, grâce à ce couplage entre les modes optiques et mécaniques, il est possible de mesurer le mouvement mécanique du résonateur (dû aux fluctuations thermiques) par un moyen optique (laser). «*En principe, un tel thermomètre peut être facilement intégré à un composant microscopique tel une puce électronique ou optique, ou encore un qubit quantique dont on souhaiterait connaître la température, commente Olga Kozlova, chercheuse en thermométrie au LNE-Cnam. Par ailleurs, d'une grande souplesse, il offre la possibilité de mesurer la température thermodynamique de différentes manières, chacune ayant sa pertinence selon la température considérée.*»

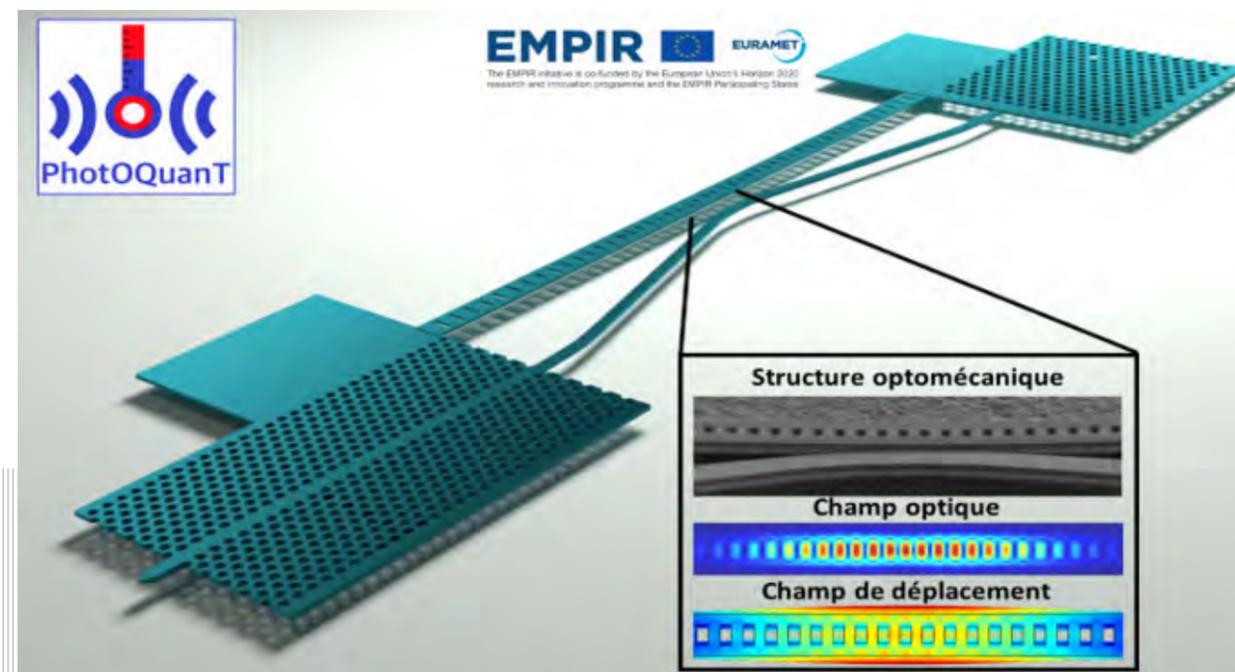
Au laboratoire de thermométrie, l'intérêt pour ces capteurs optomécaniques a débuté dès 2017, dans le cadre du projet européen PhotOQuanT du programme EURAMET-EMPIR, proposé et piloté par Stéphane Briau, physicien et professeur au Cnam. Au sein de ce projet, le partenariat français constitué entre le LNE-Cnam, le Laboratoire Kastler-Brossel (LKB) et le Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N) est parti de zéro : simulation, nano-fabrication d'un cristal photo-phononique, dispositif expérimental, instruments de mesure...

Grâce à ce premier projet, finalisé en 2021, les métrologues ont mis au point deux protocoles de mesure de la température. Le premier, photonique, est fondé sur la modification de la fréquence de

résonance optique du cristal optomécanique induite par sa dilatation thermique et la variation de son indice de réfraction sous l'effet d'une variation de température. La seconde technique, de thermométrie à bruit, consiste à mesurer le bruit mécanique de l'agitation thermique du résonateur, proportionnelle à sa température thermodynamique, par la mesure des fluctuations de phase du laser sonde. «*La première technique est relativement facile à mettre en œuvre, observe l'expérimentatrice. La dépendance en température de la fréquence optique de résonance est linéaire entre 100 K et 300 K. Mais en dessous de 100 à 50 K, la sensibilité de la fréquence à la température chute et limite le domaine d'utilisation de cette technique. La seconde technique est adaptée sur toute la gamme entre 10 K et 300 K, mais requiert un dispositif expérimental plus élaboré pour détecter optiquement le bruit mécanique.*»

LA MESURE ABSOLUE DE TEMPÉRATURE

En revanche, ces deux procédures de mesure de température ne sont pas absolues et nécessitent par conséquent une référence de température, un étalon. C'est là que l'équipe a exploité un autre avantage de ce capteur optomécanique pour accéder à la température thermodynamique de manière absolue. Exploré actuellement par les trois partenaires du projet ANR LaRaQOfT, son principe est complexe. Concrètement, cette technique utilise les corrélations quantiques entre les quadratures de phase et d'amplitude du laser sonde (résultantes du bruit de la pression de radiation) comme une échelle absolue pour mesurer le bruit mécanique du résonateur (proportionnel à sa température). «*On dispose alors en principe*



d'un thermomètre absolu, ne nécessitant aucun raccordement à une référence, expose Olga Kozlova. Cette technique, particulièrement adaptée aux mesures entre 1 K et 30 K, permettrait par ailleurs de valider et de raccorder les autres techniques de mesure, de quoi disposer in fine d'un thermomètre auto-étalonné sur une large gamme de température.» «*C'est un sujet de recherche fondamentale ambitieux et les incertitudes de mesure ne sont pas encore compétitives avec celles des meilleurs capteurs de température*», concède Mohamed Sadli, responsable de l'équipe de thermométrie. «*Mais les progrès sont devant nous ! Si nous parvenons à démontrer l'auto-étalonnage, ce serait une première mondiale*», s'enthousiasme sa collègue métrologue. Cette prouesse, les métrologues projettent de la réaliser dans le cadre de deux tout nouveaux projets européens de recherche, QUANTIFY du programme Horizon Europe et plus particulièrement PhoQuS-T du programme EPM d'EURAMET, piloté par Olga Kozlova. Ces projets seront également l'occasion de comparer différents dispositifs optomécaniques, différentes méthodes de mesure et même plusieurs degrés d'intégration des composants. De leur côté, les métrologues français demeureront, dans ces projets, les seuls à développer des techniques d'optique quantique pour la mesure absolue de température ther-

modynamique, dont l'une permettra des mesures entre 10 mK et 1 K.

UNE INFRASTRUCTURE QUANTIQUE UNIQUE EN EUROPE

Pour ce faire, le laboratoire de thermométrie du LNE-Cnam, dans le cadre de

sa participation au réseau francilien DIM (domaine d'intérêt majeur) QuantIP, fera cette année l'acquisition d'un nouveau cryostat adapté aux mesures optiques pour explorer les températures entre 1 K et 30 K, gamme de recouvrement des températures accessibles par les diffé-

DES ÉTALONS DE TRÈS HAUTE TEMPÉRATURE : POINTS FIXES JUSQU'À 3 000 K

La dissémination du kelvin peut désormais être fondée sur des points fixes (transitions de phases contrôlées et reproductibles) auxquels auront été affectées des valeurs de température thermodynamique, donc indépendantes des valeurs de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90). Aux très hautes températures, ceux-ci sont matérialisés par des alliages métalliques (métal-carbone) à la composition eutectique ou péritectique portés à leur température de fusion. Dans le cadre du projet européen Real-K, dont la partie «haute température» était coordonnée par le LNE-Cnam, six laboratoires nationaux de métrologie européens ont ainsi déterminé la température de 4 nouveaux points fixes, qui s'ajoutent à 3 autres dont la température thermodynamique avait été mesurée en 2016 (projet européen InK). Les métrologues français ont notamment mesuré la température de fusion d'un alliage péritectique de carbure de tungstène-carbone, déterminée ensuite collectivement à $3\,020,85\text{ K} \pm 0,25\text{ K}$ ($k=2$), alors que le point fixe le plus élevé de l'EIT-90, le point de congélation du cuivre, se situe à $1\,357,77\text{ K}$. Ainsi, entre 1 300 K et 3 000 K, la température thermodynamique de changement de phase de 7 points fixes est désormais connue avec une incertitude inférieure à 0,5 K. Ces points fixes permettront la réalisation et la dissémination des références SI de température avec des incertitudes et une facilité impossibles à atteindre par la méthode radiométrique directe mise en œuvre actuellement.

rentes techniques de mesure au laboratoire. Comme le résume Mohamed Sadli, « nous ambitionnons d'être, pour la métrologie thermique, les moteurs du réseau européen de métrologie constitué pour favoriser le déploiement des technologies quantiques, et de faire du RNMF une référence pour les mesures quantiques à basse température. »

Très concrètement, le LNE-Cnam va ainsi devenir l'un des points d'ancrage de la plateforme de métrologie quantique du programme national de développement des référentiels de mesure et d'évaluation des technologies quantiques, MetriQs-

France. Coordonné par le LNE dans le cadre de la Stratégie nationale quantique, il verra le déploiement d'une infrastructure de référence, au sein du RNMF. À cet effet, le LNE-Cnam se dotera d'ici une ou deux années d'un réfrigérateur à dilution pour des applications en dessous de 1 K de son futur thermomètre optomécanique. « Muni de sondes quantiques intégrables, il permettra d'effectuer des prestations externes pour mesurer la température de qubits par exemple », ajoute Olga Kozlova. Mohamed Sadli conclut : « À l'horizon 2030, si nous disposons des moyens humains et matériels

nécessaires, nous serons l'un des rares laboratoires de métrologie au monde capable de maîtriser ces techniques et de proposer des étalonnages pour ce type de thermomètres en dessous de 1 K. Une chose est sûre, depuis la nouvelle définition du kelvin, nous avançons avec détermination vers la réalisation et la dissémination de la température thermodynamique ; ce qui a le potentiel de changer le visage de la thermométrie à très basse température mais également pour l'ensemble des températures. »



CONSORTIUM DU PROJET EUROPÉEN JRP PHOTOQUANT PILOTÉ PAR STÉPHAN BRIAUDEAU.

PRIX LNE DE LA RECHERCHE 2023

BRUNO HAY RÉCOMPENSÉ POUR SES TRAVAUX EN MÉTROLOGIE DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DES MATÉRIAUX

Vous êtes directeur de recherche au LNE et responsable du pôle Photonique-Énergétique, et vous avez reçu le prix LNE de la recherche pour vos travaux en métrologie thermique. Quelle est votre spécialité ?

B.H. : Mon activité de recherche consiste à développer des références métrologiques pour la caractérisation des propriétés thermiques des matériaux telles que la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la capacité thermique massique ou encore les propriétés radiatives. Plus généralement, de formation ingénieur, j'ai un goût prononcé pour la recherche orientée vers les applications industrielles. C'est ce qui a influencé mon parcours depuis mon arrivée au LNE en 1992.

Dans cet esprit, vous êtes notamment à l'origine de la plateforme MATIS ?

B.H. : En effet, au fil des années, le développement de cette plateforme métrologique, qui rassemble de nombreux instruments pour la mesure de propriétés thermophysiques traçable au SI dans une large plage de température, a été guidé par les besoins des laboratoires de recherche publics et des industriels. C'est notamment ce qui explique son caractère intégré assez unique. Plus précisément, MATIS est tournée vers les hautes et ultra-hautes températures eu égard aux contraintes spécifiques exprimées par les industries de la Défense, du secteur spatial, nucléaire ou

encore des transports, très présentes en France.

Vous avez par ailleurs participé ou dirigé de très nombreux projets ?

B.H. : Environ une quinzaine de projets internationaux. Le dernier, Hi-TRACE, projet du programme EMPIR d'EURAMET dont j'ai été le coordinateur, est l'une de nos plus belles réussites. Finalisé en 2021, il permet désormais des mesures traçables au SI de capacité thermique massique, de diffusivité thermique et d'émissivité spectrale à très haute température. Au LNE, ce projet est à l'origine du développement d'un banc de mesure de la diffusivité thermique jusqu'à 3 000 °C avec une incertitude inférieure à 5 %. Cette installation métrologique polyvalente, qui permet également de mesurer la capacité thermique massique, est unique au monde. Les résultats de Hi-TRACE ont également nourri la révision de la norme ISO 18755 sur la mesure de la diffusivité thermique des céramiques monolithiques. Ils ont par ailleurs fait l'objet d'un article publié dans la revue *International Journal of Thermophysics*, qui a remporté le prix 2023 du *Ared Cezairliyan Best Paper Award* remis lors de l'*European Conference on Thermophysical Properties*. J'ajoute que l'ensemble des collègues qui travaillent au développement de la plateforme MATIS sont co-auteurs de cet article, ce qui donne à ce prix une valeur collective. Cette reconnaissance de nos travaux de recherche par des



pairs internationaux est en effet très fédératrice pour l'équipe.

Dans quelles directions allez-vous poursuivre vos travaux ?

B.H. : Concernant les mesures de diffusivité thermique à haute température, nous travaillons à la rédaction d'un guide de bonnes pratiques et nous allons bientôt piloter une comparaison interlaboratoire européenne. Nous envisageons également d'étendre nos moyens métrologiques actuels vers des températures plus basses afin notamment de répondre à des demandes du secteur spatial. Pour la petite histoire, nos relations avec Arianespace qui était partenaire du projet européen Hi-TRACE, nous ont permis d'intégrer le consortium d'un projet soutenu par l'Agence spatiale européenne (ESA) pour étudier des matériaux ablatifs pouvant servir

de bouclier thermique. Et par ce biais, nous avons été mis en relation avec une équipe du *Massachusetts Institute of Technology* avec laquelle nous travaillons désormais sur un sujet similaire. Nous étoffons ainsi notre réseau de partenaires qui va bien au-delà des frontières hexagonales, ce dont nous sommes très fiers !

Que représente pour vous le prix LNE de la recherche ?

B.H. : Ce prix est une belle mise en valeur des travaux de métrologie thermique que je mène avec mes collègues depuis une trentaine d'années sur cette thématique de recherche appliquée. Sur un plan personnel, il symbolise également une reconnaissance de mon activité de management de projet et des compétences d'une équipe pluridisciplinaire qui a permis de mener de front divers projets de R&D au meilleur niveau international.

LABORATOIRE DE MÉTROLOGIE DE LA DOSE : LES EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS SOUS CONTRÔLE

SPÉCIALISTES EN DOSIMÉTRIE, LES CHERCHEURS DU LNE-LNHB DÉVELOPPENT SANS CESSER UNE INFRASTRUCTURE MÉTROLOGIQUE DONT LES APPLICATIONS VONT DE LA RADIOPROTECTION À LA MÉDECINE EN PASSANT PAR LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT.



PERSONNEL IMPLIQUÉ AU LNHB-MD POUR LES PROJETS DE MAMMOGRAPHIE, DE FLASH THÉRAPIE DE RADIOPROTECTION ET DE RECHERCHE D'ÉLÉMENT CHIMIQUE DANS LES COLIS.

Un cliché de votre mâchoire chez le dentiste, une radiothérapie pour le traitement d'un cancer ou la surveillance radiologique de l'environnement, ces activités résument la façon dont les rayonnements ionisants sont présents dans notre quotidien. Afin de respecter la législation et d'en tirer le meilleur profit pour des applications médicales, il est nécessaire de mesurer la «dose» due à ces rayonnements (rayons X, gamma, bêta ou neutrons) et d'assurer la traçabilité au SI de cette mesure. Le domaine de métrologie associé à ces mesures est appelé dosimétrie des rayonnements ionisants. Au sein du RNMF, la mission nationale de métrologie pour les références de dosimétrie revient au laboratoire de Métrologie de la Dose (MD) du LNE-LNHB, l'une des deux entités du Laboratoire National Henri Becquerel. Unité de l'institut List du CEA à Saclay, le LNE-LNHB est l'un des laboratoires nationaux de métrologie fédérés par le LNE. Composé d'une vingtaine de personnes, le laboratoire MD met en place les références nationales de mesure et assure leur dissémination pour la radiothérapie, le radiodiagnostic, la radioprotection et l'irradiation industrielle.

Les unités du SI relatives à la dosimétrie sont le gray (Gy) et le sievert (Sv). La première exprime l'énergie absorbée par unité de masse et la seconde pondère la première en fonction des effets biologiques. «Ce ne sont pas des unités de base du SI mais des unités dérivées que nous relient aux unités de base

du temps, de longueur, de masse et de courant électrique...», formule Jean-Marc Bordy, chercheur au laboratoire MD.

Concrètement, la première tâche de ce laboratoire consiste à établir des références. Pour ce faire, les spécialistes disposent d'un ensemble de sources de rayonnement semblables à celles des utilisateurs, typiquement des faisceaux de radiothérapie : trois et quatre respectivement pour les électrons et les photons de haute énergie (supérieure au MeV) et une quarantaine de faisceaux de rayons X entre 30 et 320 kV pour l'imagerie et la radioprotection. D'autres sont spécifiques à la curiethérapie. Les étalons primaires de « dose » consistent alors en un ensemble d'instruments de mesure développés au laboratoire et qui permettent une mesure absolue des grandeurs dosimétriques dans les faisceaux, ces derniers faisant alors figure d'étalons secondaires. Comme le détaille Attila Verès, responsable du laboratoire MD, «selon les cas, ce sont des calorimètres pour mesurer l'élévation de température consécutive à l'irradiation, des chambres d'ionisation à parois d'air pour quantifier les rayonnements de faible énergie ou à cavité pour les énergies plus élevées ou encore des chambres d'ionisation à extrapolation pour les particules bêta.»

Le travail du laboratoire autour des références primaires relève principalement de la R&D. Celui de leur dissémination vers les utilisateurs consiste en des prestations d'étalonnage pour des laboratoires d'étalonnage accrédités ou des instituts

de recherche, des industriels, hôpitaux ou services de dosimétrie. «L'appareil de mesure à étalonner est irradié dans nos faisceaux de référence et on relie la valeur indiquée par l'appareil à la valeur de référence de la dose délivrée. L'instrument étalonné peut alors être utilisé pour étalonner à son tour un faisceau ou pour mesurer une dose dans un contexte de radioprotection», explique le physicien.

Cela dit, que ce soit pour suivre l'évolution de la réglementation, notamment pour la protection de l'environnement, ou bien pour répondre à des besoins en constante évolution dans le domaine médical, les métrologues du laboratoire consacrent une part importante de leur temps à la recherche. D'un mot, ils doivent en permanence développer de nouvelles références pour des applications émergentes. «Le nombre de projets de recherche auxquels nous participons est variable d'une année à l'autre. Mais à titre indicatif, sept nouveaux projets débutent cette année», recense Attila Verès.

Parfois, un projet résulte d'une demande formulée par un partenaire, comme c'est le cas d'une nouvelle étude sur la radiothérapie FLASH. Imaginé il y a une dizaine d'années à l'Institut Curie, ce nouveau procédé de traitement du cancer consiste à délivrer un très haut débit de dose en quelques microsecondes, ce qui épargne davantage les tissus sains et minimise l'erreur due au mouvement de l'organe pendant le traitement. Aujourd'hui, les toutes premières installations de ce type font leur apparition, dont une à l'Institut Gustave Roussy (IGR), premier établissement de soins à en être doté en France. Or comme l'indique Benjamin Rapp, chercheur dans l'équipe, «ces machines ont besoin d'être étalonnées, raison pour laquelle l'IGR nous a sollicités.» Dans le cadre du projet qui débute, il s'agira pour les métrologues de tester de nouveaux détecteurs pour caractériser ces impulsions d'électrons ultracourtes d'énergie entre 6 et 10 MeV, et d'établir une métrologie primaire permettant de les raccorder.

En parallèle, les scientifiques projettent de participer à la caractérisation métrologique d'un accélérateur FLASH de très haute énergie (100 à 200 MeV) qui est envisagé sur le site de l'Institut Curie à Orsay. Comme le précise le chercheur, «il permettra d'étudier de nouvelles modalités de traitement médical destinées à cibler des tumeurs profondes.»

Toujours dans le secteur médical, un autre projet débute autour de la mammographie numérique, en collaboration avec l'Hôpital européen George Pompidou. Il a pour objectif d'améliorer la mesure de la dose délivrée à la glande mammaire lors de cet examen. De fait, comme l'explique Jérémie Lefèvre, chercheur au sein du même laboratoire, «l'estimation de la dose reçue est fondée sur d'anciens modes d'imagerie, elle n'est pas individualisée et est établie a posteriori.» Pour faire mieux, les spécialistes proposent de déterminer précisément le spectre d'énergie du faisceau d'un mammographe numérique, de le reproduire au laboratoire MD et d'estimer la dose reçue par le tissu mammaire au moyen d'un « fantôme » de sein instrumenté, développé au cours de ce projet. In fine, la traçabilité de la dose reçue par le tissu mammaire sera assurée via l'étalonnage des instruments de mesure des praticiens réalisé sur l'installation du LNE-LNHB.

Attila Verès ajoute : «spécialistes en métrologie nucléaire, les chercheurs du LNE-LNHB peuvent facilement basculer d'une problématique à une autre. Et quand les projets ne résultent pas d'une demande extérieure, ils émanent de propositions des uns ou des autres, sur la base d'un travail de veille auquel nous nous livrons toutes et tous.» Par exemple, le laboratoire s'est lancé il y a 3 ans dans la mise en place d'une installation



INSTRUMENT DE MESURE PRIMAIRE INSTALLÉ DANS LE FAISCEAU DE PHOTON DU MAMMOGRAPHE DU LNHB-MD.

pour l'étalonnage d'instruments de mesure pour la dosimétrie de l'environnement, au niveau du bruit de fond radiologique naturel. «Jusqu'à alors ces instruments étaient étalonnés à des débits de dose beaucoup plus forts, alors qu'ils sont ensuite utilisés pour mesurer de très faibles débits de dose, sans y avoir été testés», résume Jean-Marc Bordy. Pour y remédier, les métrologues terminent actuellement le développement d'une enceinte blindée «faite maison» qui permettra de s'affranchir en partie du bruit de fond naturel et d'étalonner les instruments à des niveaux de dose comparables à leur utilisation. En ce début d'année, les chercheurs s'apprentent à réaliser le transfert de leurs références primaires aux sources radioactives de l'enceinte. «Au-delà du besoin propre du projet, nos mesures en environnement confiné permettront d'étendre la gamme de débit de dose disponible pour le test et l'étalonnage d'instruments de mesure», indique l'expert.

Enfin, les chercheurs du laboratoire mènent également des travaux plus exploratoires. C'est le cas typiquement de recherches menées dans le cadre d'une thèse de doctorat pour tenter d'utiliser des faisceaux d'électrons, produits par un accélérateur médical du laboratoire, afin de détecter des molécules chimiques dans un colis. En interagissant avec son contenu, les électrons provoquent l'émission de photons qui à leur tour interagissent avec les noyaux atomiques environnant pour produire des neutrons – on parle ici de photo-neutrons – dont l'énergie est caractéristique des éléments impliqués. Comme l'indique Attila Verès, «avec l'aide de l'intelligence artificielle pour analyser les spectres d'énergie des neutrons très complexes, on peut alors déduire les éléments chimiques en présence.» Objectif : produire une preuve de concept d'une nouvelle méthode de détection des produits illicites. Une chose est certaine, avec l'arrivée de cinq nouvelles personnes l'année passée au laboratoire, la dosimétrie pratiquée au laboratoire de Métrologie de la Dose du LNE-LNHB n'a définitivement rien d'un travail routinier.

LA MÉTROLOGIE REÇUE À L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

Le 25 octobre dernier, l'Académie des technologies a reçu le LNE pour une séance thématique intitulée «Le système international d'unités (SI) version 2018 – Quels impacts et quelles perspectives ? Établissement public placé sous la tutelle du ministre chargé de la recherche, cette société savante a pour but «une appropriation toujours plus raisonnée et collective des technologies». Comme l'analyse Maguelonne Chambon, directrice R&D du LNE, «cette invitation à présenter les dernières évolutions du SI aux membres de l'Académie des technologies manifeste le caractère transverse de la métrologie comme discipline indispensable à l'innovation technologique.». Lors de cette séance, Matthieu Thomas, chef de projet au LNE, Wilfrid Poirier, directeur de recherche au LNE, et Sébastien Bize, directeur de recherche du CNRS au LNE-SYRTE, sont intervenus pour présenter respectivement les nouvelles définitions, et leurs conséquences, du kilogramme et de l'ampère telles qu'adoptées en 2018 par la Conférence générale des poids et mesures, ainsi que la feuille de route pour une redéfinition de la seconde autour de 2030. Comme ils l'ont rappelé, la totalité des unités du SI sont désormais fondées sur des constantes fondamentales de la physique. Ainsi la définition du kilogramme se réfère à la valeur de la constante de Planck,

h, et l'ampère à celle de la charge élémentaire, e. La seconde, elle, est définie à partir d'une transition atomique du césium. Historiquement, chaque nouvelle définition d'une unité du SI s'est accompagnée d'innovations. À titre d'exemple, le GPS aurait été quasi-impossible à développer sans la définition du mètre de 1983. S'il est encore trop tôt pour entrevoir l'impact concret qu'aura la réforme du SI de 2018, les acteurs de l'innovation (laboratoires de recherche, industriels, start-up...) sont conscients de l'importance de la métrologie et de ses évolutions pour leurs activités.

Le LNE et les laboratoires du RNMF ont été des acteurs de premier plan dans les recherches qui ont permis l'adoption de ces nouvelles définitions. Aujourd'hui, les travaux se poursuivent afin d'assurer leur meilleure réalisation possible ainsi que leur dissémination vers les utilisateurs finaux.

Signe qui ne trompe pas du caractère central du LNE en la matière : d'autres rendez-vous avec l'Académie des technologies sont déjà programmés pour l'année en cours. Ils seront l'occasion pour le laboratoire de présenter ses travaux en lien avec l'intelligence artificielle, les technologies quantiques, la santé ou encore l'environnement. Autant de domaines où les progrès techniques sont intimement liés à ceux de la métrologie.



Mathieu Thomas,
INGÉNIEUR-CHERCHEUR AU LNE



Wilfrid Poirier,
INGÉNIEUR-CHERCHEUR AU LNE



Sébastien Bize,
DIRECTEUR DU LNE-SYRTE
À L'OBSERVATOIRE DE PARIS - PSL

FÊTE DE LA SCIENCE : LA MÉTROLOGIE, MEILLEURE ALLIÉE CONTRE LE GASPILLAGE ÉNERGÉTIQUE

fête de la Science

Les économies d'énergie et l'efficacité énergétique sont au cœur des politiques de lutte contre le réchauffement climatique et pour la préservation de l'environnement. À ces fins, la métrologie est une composante incontournable de l'arsenal à mobiliser. Pour l'illustrer, le LNE a mis en ligne le 9 octobre dernier une infographie interactive à l'occasion de la fête de la science. Elle montre que la sobriété énergétique commence par mesurer correctement ce dont on parle. Sous une forme didactique mettant en scène une maison individuelle dans son environnement semi-urbain, l'infographie concoctée par le Service communication (avec la participation des pôles Métrologie électrique, Photonique-énergétique et Énergie, environnement et combustion) propose d'explorer cette réalité à travers les enjeux énergétiques du quotidien.

On y découvre ainsi que, derrière des questions comme la consommation électrique, les performances d'un produit isolant, la part de renouvelable dans le mix énergétique consommé, les besoins en éclairage... il y a des métrologues. Précisément, c'est le LNE qui certifie qu'un matériau isolant a une durée de vie de 50 ans. La nuit, c'est son véhicule laboratoire qui parcourt les rues et thermographie le réseau de chaleur urbain. Et c'est encore le LNE qui teste la conformité et les performances des compteurs électriques personnels de type Linky. Toutes ces informations, et plus encore, sont à retrouver sur le site du LNE à l'adresse suivante : <https://energie-au-quotidien.lne.fr>. Elles nous rappellent que la maîtrise de l'énergie, c'est d'abord une question de mesure !



CHIFFRES CLÉS

L'infographie sur l'énergie au quotidien mise en ligne par le LNE a été consultée 2 000 fois et 73 000 clics ont été enregistrés, soit 37 clics par visite. Sa réalisation a mobilisé 14 métrologues et 3 personnes du service de communication du laboratoire.

COMPÉTITIVITÉ INDUSTRIELLE

IA, ÉCLAIRAGE, DÉMANTÈLEMENT NUCLÉAIRE... LE LNE ET LE RNMF SONT AUX CÔTÉS DES INDUSTRIELS DANS TOUTES LES DIMENSIONS DE LEURS ACTIVITÉS. LA MÉTROLOGIE EST DE FAIT INDISPENSABLE À L'ÉMERGENCE DE TECHNOLOGIES INNOVANTES, À LA MISE EN ADÉQUATION DES ÉQUIPEMENTS AUX EXIGENCES NORMATIVES ET À LA FERMETURE DES INFRASTRUCTURES MOINS PERFORMANTES.

L'ÉVALUATION DES ROBOTS À BASE D'IA, ACCÉLÉRATEUR DE LA FILIÈRE ROBOTIQUE

DANS LE CADRE DU PROJET EUROPÉEN METRICS, PILOTÉ PAR LE LNE, LES MÉTROLOGUES FRANÇAIS ONT PROPOSÉ UNE MÉTHODE CONTRÔLÉE POUR L'ÉVALUATION DES ROBOTS, MISE EN ŒUVRE LORS DE QUATRE COMPÉTITIONS DE ROBOTIQUE. CE PROJET CONTRIBUE À L'ÉMERGENCE D'UNE FILIÈRE INDUSTRIELLE EUROPÉENNE EN ROBOTIQUE ET IA, SOUVERAINE ET ÉTHIQUE

D'ésherber un champ, assister une personne âgée à domicile ou intervenir sur une infrastructure critique... demain, il est possible que nous cohabitons avec des robots, au travail comme à la maison. Mais les technologies concernées sont-elles prêtes ? Quoi qu'il en soit, rendre l'industrie robotique et d'intelligence artificielle (IA) souveraine et éthique figure au programme de la Commission européenne. Dans ce but, il faut apporter la preuve que les solutions proposées répondent aux attentes. Pour ce faire, il faut pouvoir tester les robots autonomes selon un protocole d'évaluation contrôlé et reproductible. Définir une approche d'évaluation généralisable à différents domaines, et la mettre en œuvre, était l'objectif du projet METRICS (<https://metricsproject.eu/>), financé par le programme de recherche et d'innovation «Horizon 2020» de l'Union européenne*, coordonné par le LNE et finalisé en fin d'année dernière. Réunissant dix-sept partenaires de huit pays, il a permis d'organiser une série de compétitions internationales de robots dans quatre secteurs d'application identifiés comme prioritaires par la Commission : santé, inspection et maintenance des infrastructures, production agile, et agroalimentaire.

Véritables accélérateurs de l'innovation, les compétitions de robots sont déjà nombreuses et sont parfois populaires à l'instar de la RoboCup, mais les méthodologies déployées étant peu ou pas harmonisées, leurs résultats sont difficilement comparables. Pour y remédier, les experts du LNE ont proposé une méthode générique d'évaluation, adaptable à tous types de compétitions de robots, qui puisse faire office de référence en la matière.

Concrètement, pour mettre à l'épreuve les performances d'un robot, il s'agit de tester chacune de ses fonctionnalités et d'évaluer sa capacité à accomplir différentes tâches particulières. «Le premier type d'essais comparatifs permet d'évaluer chaque composante d'un robot ; le second, la façon dont elles fonctionnent de manière intégrée, décrypte Virginie Barbosa, coordinatrice du projet européen. D'où l'importance de recourir de manière indépendante à ces deux types de tests.» Les scientifiques ont par ailleurs défini deux modalités de test : l'une physique, dans un environnement réel, l'autre virtuelle à partir de données (images, sons, vidéos...) à collecter, annoter et/ou qualifier. «Si la nécessité des tests physiques des robots est évidente, les tests virtuels sur les composants IA sont plus faciles à mettre en œuvre et ce dans des conditions reproductibles, commente la cheffe de projets du LNE. Ils sont également très utiles pour la communauté de l'évaluation de l'IA.» Enfin, l'équipe projet, spécialiste des technologies IA, a élaboré des



Trois questions à...

VIRGINIE BARBOSA, CHEFFE DE PROJETS ÉVALUATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Avec le pilotage du projet METRICS, le LNE s'affiche tel un acteur incontournable de l'essor de la robotique et de l'IA en Europe ?

Virginie Barbosa : En effet, l'arrivée à maturité de ces technologies nécessite la mise en place de référentiels d'évaluation. C'est une première étape indispensable afin de faire émerger une filière industrielle et augmenter l'acceptabilité sociale des robots autonomes et de l'IA en général. En la matière, le LNE déploie son expertise et son savoir-faire méthodologique tant pour les aspects de logiciels IA que des dispositifs physiques et des données.

La voie de l'industrialisation des systèmes robotiques et d'IA passe également par l'établissement de normes adaptées ?

V.B. : C'est très important. Grâce au projet METRICS, nous avons formulé des propositions à l'attention du Comité technique «Intelligence artificielle» de CEN-CENELEC. Elles portent sur la méthodologie d'évaluation des systèmes robotiques qui embarquent de l'intelligence artificielle et sur l'organisation même d'une compétition de robots. Nos partenaires anglais ont de leur côté pu contribuer à la révision complète d'une norme anglaise sur l'évaluation éthique des robots, révision exploitée ensuite pour transmettre une proposition au groupe de travail d'IEEE chargé d'élaborer des plans d'expérience pour l'évaluation d'interactions homme/machine.

Le LNE dispose aussi de moyens de test des systèmes robotiques et/ou d'intelligence artificielle ?

V.B. : Oui, ils sont regroupés au sein de la plateforme LEIA dont le second volet «Immersion» sera inauguré cette année. Cette partie permettra d'évaluer des robots dans un environnement virtuel. Et ces installations ont tout leur intérêt dans le cadre des quatre *Testing & Experimentation Facilities* (TEF) mis en place par la Commission européenne pour soutenir le déploiement d'une IA souveraine et éthique.



UN DES ROBOTS AGRICOLES AUTONOMES PENDANT L'ÉVALUATION SUR LE TERRAIN EXPÉRIMENTAL (MONTOLDRE, ALLIER - SEPTEMBRE 2021).

critères d'évaluation fondés sur la comparaison des résultats obtenus par un robot avec ceux d'un opérateur humain ou issus de mesures, considérés comme références.

À partir de cette architecture commune, les différents partenaires du projet ont ainsi pu proposer une série de compétitions ouvertes à tous les concepteurs de robots : en 2021, une compétition «à blanc» afin de valider les protocoles, puis, les deux années suivantes, deux autres compétitions pour évaluer les progrès. Par exemple, en juillet 2022, quatre robots autonomes sous-marins se sont affrontés dans le bassin du Centre de recherche et d'expérimentation maritime, à La Spezia en Italie, autour d'un scénario représentatif d'une intervention sur une fuite d'hydrocarbure d'une infrastructure pétrolière off-shore.

De même, en 2023, à Londres, plusieurs robots d'assistance ont été testés pour évaluer leur aptitude à identifier et à apporter un objet demandé par une personne dans l'incapacité de se déplacer. Quant aux robots impliqués dans les compétitions du secteur agroalimentaire, les experts ont pu tester leur habilité à identifier différentes espèces de plantes avant de les essayer pour le désherbage en plein champ. «En tout, le projet METRICS a permis de mettre au défi plus de cinquante robots lors des campagnes physiques, se félicite Virginie Barbosa. Près de quarante équipes nous ont par ailleurs fourni leurs résultats sur l'ensemble des campagnes virtuelles.»

Pour les participants, le projet leur a permis de bénéficier d'un environnement de test auquel ils n'ont pas accès habituellement, et d'accéder à des bases de données conséquentes utilisables pour l'apprentissage de leurs algorithmes d'intelligence artificielle. METRICS a aussi été l'occasion de structurer un peu plus le réseau européen de la robotique autour de la définition de bonnes pratiques d'évaluation. Celles-ci sont essentielles aux développeurs pour se positionner face à la concurrence et apprécier les efforts de R&D restant encore à fournir pour que les robots s'insèrent au mieux dans notre quotidien.

* Grant agreement No 871252.

CHIFFRES CLÉS

Le projet européen METRICS a permis d'organiser une série de trois compétitions dans quatre domaines d'application de la robotique. Elles ont permis d'évaluer 22 robots en 2022 et 30 en 2023. Près de 40 équipes ont également fourni leurs résultats à l'issue des campagnes virtuelles. Les 17 partenaires du projet ont déjà soumis 21 articles à des revues scientifiques.



ÉVALUATION D'UN ALGORITHME IA DE DÉTECTION DE FISSURES À L'AIDE DE LA SUITE OPEN SOURCE MATICS.

GRAPHÈNE : MIEUX LE CARACTÉRISER POUR ACCÉLÉRER L'INNOVATION

Le graphène possède des propriétés physiques et chimiques exceptionnelles. Pour accélérer l'arrivée à maturité des innovations technologiques qui en tireront partie, il est indispensable de développer des méthodes de mesure fiables et harmonisées pour déterminer ses propriétés. C'est ce à quoi s'est employé le LNE dans le cadre du projet prénormatif européen ISO-G-SCoPe, finalisé l'année dernière.

Plusieurs techniques, notamment de microscopie, permettent d'accéder aux propriétés d'un échantillon de graphène : microscopie Raman pour déterminer le nombre de couches, MEB et AFM pour ses dimensions latérales et de hauteur respectivement, XPS pour déterminer la composition chimique d'oxyde de graphène ou de graphène fonctionnalisé.

Afin d'évaluer les capacités de caractérisation du graphène, le LNE, en collaboration avec le CNRS-C2N, a mis au point des échantillons compatibles avec les techniques de microscopie.

Munis d'un réseau pour l'étalonnage dimensionnel (dimensions latérales et hauteurs) et de motifs permettant le repositionnement, ils ont ensuite été utilisés pour une comparaison menée dans le cadre d'une étude internationale de pré-normalisation sur les matériaux avancés (VAMAS) dont le LNE est le représentant français.

Participer à cette comparaison a également été l'occasion de mettre en œuvre les procédures de mesure et de caractérisation proposées par les partenaires. «Les résultats sont en cours d'analyse, mais nous devrions atteindre des incertitudes de mesure inférieures à 5 % avec le MEB, à 10 % avec l'AFM, à deux couches avec le microscope Raman, et plus faibles que les 55 % actuels avec la technique XPS», détaille Alexandra Delvallée, chercheuse en nanométrie au LNE. In fine, le projet permettra la révision de trois normes ISO relatives à la caractérisation des propriétés du graphène.

LA PRÉCISION DE LA MESURE GÉODÉSIQUE DÉSORMAIS EN DEÇÀ DU MILLIMÈTRE

Pour la géophysique et la construction de grandes infrastructures, les besoins de précision en géodésie vont croissants. Y répondre était l'objectif du projet EURAMET-EMPIR GeoMetre, terminé en 2023, et auquel le LNE-Cnam a participé avec 14 autres partenaires. Les métrologues français y ont développé des instruments de mesure sur deux fronts.

D'une part, ils ont développé un système pour déterminer le point de référence des antennes de 10 à 20 m de diamètre utilisées dans le cadre du système interférométrique VLBI qui contribue à l'établissement des références terrestres en mesurant la distance entre les antennes d'un réseau mondial et des sources astronomiques lointaines. Comme le décrit Jean-Pierre Wallerand, spécialiste des références de longueur au LNE-Cnam, «mis en œuvre sur l'antenne du site de Wettzell en Allemagne, notre

système a permis de localiser ce point invariant avec une incertitude de 100 µm, contribuant ainsi au raccordement des différents types d'instruments de géodésie utilisés sur le site allemand.»

D'autre part, les métrologues du Cnam ont mis au point un télémètre laser pour mesurer des distances entre 5 km et 10 km. Opérant simultanément à deux longueurs d'onde, il permet de s'abstraire des corrections liées aux variations de température et de pression du milieu traversé par le faisceau laser. Testé lors de plusieurs campagnes de mesure, et notamment lors d'une comparaison avec des techniques de positionnement par satellites réalisée au Cern près de Genève, cet instrument permet de mesurer une distance de 5 km avec une incertitude-type de 250 µm. Sa technique est la seule à offrir la possibilité de dresser un bilan d'incertitude complet de la mesure de grande distance.



TÉLÉMÈTRE À DEUX LONGUEURS D'ONDE MESURANT LA LIGNE DE RÉFÉRENCE EURO5000 EN POLOGNE.

ÉTALONNAGE DES IMPÉDANCES ÉLECTRIQUES : UN SYSTÈME PLUS COMPLET, SIMPLIFIÉ ET PLUS RAPIDE



MESURE MÉTROLOGIQUE DE L'IMPÉDANCE AVEC LE NOUVEAU PONT NUMÉRIQUE DÉVELOPPÉ.

Pour étalonner des impédances, le «pont de comparaison» utilisé permet de comparer le rapport de deux tensions étalons à celui de deux impédances dont l'une est inconnue. C'est avec un tel dispositif que le LNE étalonne les références de son Centre d'étalonnage qui à son tour effectue des prestations d'étalonnage pour des industriels. Ces systèmes permettent d'atteindre une incertitude relative de 10^{-9} mais ils sont chronophages et très complexes à mettre en œuvre. Aussi, dans le cadre d'un projet d'amélioration des références nationales, les métrologues du laboratoire d'électricité fondamentale du LNE, en collaboration avec le laboratoire national tchèque, le CMI, ont-ils développé un pont de comparaison numérique plus souple d'utilisation.

Concrètement, le remplacement de transformateurs étalons par des sources numériques de tension permet d'automatiser les mesures et de comparer des impédances de nature différente (capacité et résistance, inductance et résistance...), ce qui n'était pas possible auparavant. «Dans le mode entièrement numérique, l'incertitude relative de mesure atteint 10^{-9} , et 5×10^{-8} si les anciens transformateurs sont utilisés dans la nouvelle infrastructure numérique de contrôle, indique Almazbek Imanaliev, chercheur en métrologie électrique. C'est moins bon qu'avec le système classique, mais cela permet néanmoins de couvrir la plupart des besoins et surtout beaucoup plus simplement.»

En outre, les sources numériques de cette nouvelle installation pourront être remplacées, à terme, par deux étalons quantiques de tension Josephson. Cette future évolution ouvre la voie vers une réalisation des unités d'impédance à partir des étalons quantiques de résistance et de tension, en cohérence avec la dernière révision du SI.

CARACTÉRISATION DES LUMINAIRES À LED, BIENTÔT UNE TRAÇABILITÉ MÉTROLOGIQUE ADAPTÉE ET NORMALISÉE

Les lampes à incandescence sont vouées à disparaître du marché. Dans le cadre du projet européen RevStdLED, finalisé l'année dernière, le LNE a contribué à adapter l'ensemble de la chaîne de traçabilité métrologique de caractérisation des sources d'éclairage, aux sources à base de LED (diode électroluminescente).

Les métrologues français ont pris part à plusieurs segments du projet. Avec leurs sources de référence, ils ont caractérisé finement la réponse d'un vidéo-photomètre en fonction de l'intensité de la lumière. Comme l'explique Jimmy Dubard, responsable du laboratoire de Radiométrie-Photométrie au LNE, «Cet instrument, qui permet de caractériser la luminance de chaque point lumineux d'un luminaire, est utilisé sur le goniophotomètre en champ proche et est une alternative intéressante à la méthode classique (champ lointain) utilisant un photomètre. Cette dernière nécessite en effet de se placer à

très grande distance de la source, ce qui n'est pas le cas avec un vidéo-photomètre».

Par ailleurs, le LNE a rédigé ou contribué à l'édition de guides de bonnes pratiques pour évaluer les incertitudes de mesure qui prennent en compte les corrélations d'ordre spectral existantes d'une part entre les différents points de mesure de la réponse spectrale des instruments utilisés, et d'autre part entre les différents résultats de mesure de la distribution spectrale des sources. C'est d'autant plus important que les sources LED offrent une variété spectrale plus grande que les lampes à incandescence.

À l'issue de ce projet européen, les résultats ont été transmis aux organismes de normalisation pour réviser les normes CIE S 025 sur la caractérisation des luminaires et CIE S 023 sur la caractérisation des luxmètres et luminancemètres.

LA PAROLE À...

VALÉRIE LOURENÇO, CHERCHEUSE AU LNE-LNHB

LAURENT CRONIMUS, CHARGÉ D'AFFAIRES À L'AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

95 RÉACTEURS NUCLÉAIRES SONT EN COURS DE DÉMANTÈLEMENT DANS L'UNION EUROPÉENNE ET, À TERME, LES 131 RESTANTS DEVRONT L'ÊTRE ÉGALEMENT. PAR AILLEURS, CHAQUE ANNÉE, L'ANDRA GÈRE L'ASSAINISSEMENT DE PLUSIEURS SITES CONTAMINÉS. AFIN DE D'ORIENTER AU MIEUX LES DÉCHETS RADIOACTIFS VERS LA BONNE FILIÈRE, IL EST NÉCESSAIRE D'EN CARACTÉRISER L'ACTIVITÉ AU PLUS JUSTE. CE À QUOI DEVRAIT CONTRIBUER LES RÉCENTS TRAVAUX MENÉS PAR LE LNE-LNHB.



Vous avez récemment mené des travaux de métrologie en lien avec le démantèlement et l'assainissement de sites nucléaires. De quoi s'agissait-il ?

Valérie Lourenço : Le démantèlement ou l'assainissement d'une installation nucléaire débute par un inventaire radiologique exhaustif et précis. Or les moniteurs de contamination surfacique utilisés pour cet inventaire sont étalonnés à l'aide de sources idéales qui ne tiennent pas compte de la forme complexe et des états de surface des pièces réelles à traiter, si bien qu'en pratique, des corrections importantes doivent être apportées aux mesures. Ainsi, dans le cadre d'un projet financé par le CEA et le LNE, l'objectif était de développer des sources radioactives adaptées à l'étalonnage d'instruments de mesure dans le contexte du démantèlement et de l'assainissement.

Quel est l'intérêt de disposer de sources de ce type, du point de vue de l'Andra ?

Laurent Cronimus : L'une des missions de service public de l'Andra consiste à gérer l'assainissement de sites dits orphelins tels d'anciennes usines ou des bâtiments ayant par exemple servis d'atelier où des peintures luminescentes ont été utilisées dans les années 1930 à 1950. Dans de tels contextes, les radioéléments rencontrés peuvent être très variés, avec des spectres d'énergie atypiques, et présents sous des formes extrêmement hétéroclites : surfaces courbes, rugueuses, recouvertes de peinture... Afin d'en réaliser un inventaire précis, ce qui conditionne ensuite la nature de la prise en charge à effectuer, il serait très intéressant de disposer de sources étalons adaptées à ce besoin, d'où l'intérêt pour nous du projet mené par Valérie Lourenço.

Concrètement, qu'avez-vous réalisé ?

V.L. : L'un des enjeux principaux du projet était de trouver une solution permettant de garantir la tenue de la radioactivité déposée sur une surface complexe. Nous avons essayé plusieurs solutions avant de montrer qu'un dépôt d'oxyde de manganèse permettait une bonne adhésion aussi bien sur des surfaces d'aluminium que de polymères moulables. Par ailleurs, nous avons montré que nous sommes capables de garantir une uniformité du dépôt à quelques pourcent près sur des surfaces de grande dimension. Ces résultats sont une première étape et sont très encourageants dans la perspective de proposer des supports de forme variée et présentant une importante rugosité, par exemple par adjonction de sable dans une matrice polymérique, ou bien recouverts de peinture.

Ces résultats ouvrent-ils des perspectives intéressantes pour vous ?

L.C. : Sans aucun doute. Les résultats complets du projet du LNE-LNHB ne seront évalués qu'en mai prochain mais on peut déjà anticiper qu'ils ouvrent la possibilité de disposer de surfaces étalons proches de la réalité du terrain, dans des contextes où, contrairement au cas de l'industrie électronucléaire qui peut bénéficier d'un effet d'échelle, l'hétérogénéité des situations rencontrées peut être très large. Cela préfigure de disposer d'inventaires radiologiques moins soumis à discussion et de pouvoir ensuite optimiser la gestion des déchets.

DES NANOFILS POUR RÉCUPÉRER DE L'ÉNERGIE : VERS UNE MÉTROLOGIE ADAPTÉE

LES NANOFILS SEMI-CONDUCTEURS SONT PROMETTEURS POUR RÉALISER DES SYSTÈMES DE RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE. ILS SONT NÉANMOINS DIFFICILES À TESTER ET À CARACTÉRISER. AINSI, LE PROJET EUROPÉEN NANOWIRES DU PROGRAMME EMPIR D'EURAMET, FINALISÉ L'ANNÉE DERNIÈRE ET AUQUEL 3 ÉQUIPES DE MÉTROLOGIE DU LNE ONT PARTICIPÉ, VISAIT À AMORCER LA MISE EN PLACE D'UNE MÉTROLOGIE ADAPTÉE.

Dans ce but, le laboratoire français a tiré profit de son offre large en matière de caractérisation métrologique à l'échelle nanométrique.

Ainsi, les métrologues ont utilisé un AFM¹ et un MEB² pour caractériser les dimensions (hauteur, rugosité, diamètre) des nanofils isolés et au sein d'un réseau (distance entre les fils). «Pour les échantillons présentant un alignement régulier de nanofils, nous avons travaillé à la mise en place de protocoles automatisés d'analyse», complète Alexandra Delvallée, chercheuse dans l'équipe de nanométrie dimensionnelle. Concernant les propriétés électriques, les scientifiques sont parvenus à réaliser pour la première fois une mesure traçable au SI de la concentration de dopants au sein de nanofils verticaux à partir d'un SMM³. Pour ce faire, ils ont développé des structures multicouches de référence avec des concentrations graduelles de dopants, dont la valeur a été mesurée par SIMS⁴. «Nos mesures fournissent des valeurs proches des valeurs attendues, avec une incertitude comprise entre 10 % et 30 %», se félicite François Piquemal, responsable de l'équipe de métrologie électrique fondamentale du LNE. En revanche, il a été plus difficile d'accéder aux propriétés photovoltaïques des nanofils, même si les chercheurs ont montré que les mesures

réalisées avec une station sous pointe, plus faciles à mettre en œuvre, étaient cohérentes avec les résultats obtenus avec le C-AFM⁵.

Enfin, concernant les propriétés thermiques, les métrologues ont commencé par réduire à 10 % l'incertitude sur la mesure par SThM⁶ de la conductivité thermique de matériaux massifs, étape nécessaire avant d'adapter le protocole à la caractérisation de nanofils. «Nos travaux de recherche et l'acquisition d'un nouvel équipement en fin de projet ont ouvert des pistes, et laissent entrevoir des solutions pour limiter les incertitudes de mesure liées au déplacement de la pointe sur les surfaces nanostructurées», explique Nolwenn Fleurence, ingénieure de recherche en métrologie thermique.

Autant de résultats qui aideront à optimiser la conception de futurs dispositifs à base de nanofils, pour récupérer, transformer ou utiliser de l'énergie.

¹ AFM - Microscope à force atomique

² MEB - Microscope électronique à balayage

³ SMM - Microscope à sonde locale électrique micro-onde

⁴ SIMS - Spectroscopie de masse des ions secondaires

⁵ C-AFM - Microscope à force atomique à pointe conductrice

⁶ SThM - Microscope thermique à sonde locale

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

L'EFFICACITÉ ET LA SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUES SONT AFFAIRE DE « MESURE ». POUR ACCOMPAGNER LA TRANSITION, LE LNE ET LE RNMF SONT SUR TOUS LES FRONTS. LEURS TRAVAUX PARTICIPENT À LA SURVEILLANCE DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES, AU DÉPLOIEMENT DE L'HYDROGÈNE, OU ENCORE À L'OPTIMISATION DES DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES OU DE RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE.

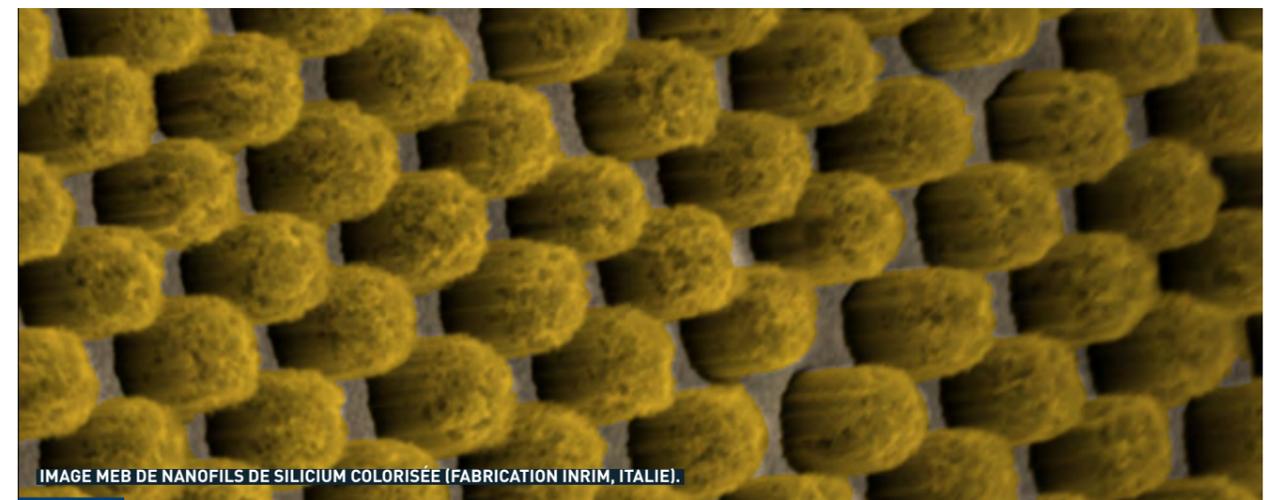


IMAGE MEB DE NANOFILS DE SILICIUM COLORISÉE (FABRICATION INRIM, ITALIE).

CELLULES PV : UNE MÉTROLOGIE ADAPTÉE À TOUTES LES SITUATIONS D'ILLUMINATION

Les performances des cellules photovoltaïques (PV) diffèrent selon les technologies considérées et selon les conditions d'illumination. Leur caractérisation métrologique nécessite par conséquent la mise en place d'une infrastructure de mesure spécifique, ce qui était l'objectif du projet européen du programme EURAMET/EMPIR, Metro-PV, terminé en 2023 et auquel le LNE a participé.

Les métrologues français ont en particulier apporté leur expertise pour la caractérisation de cellules PV sous éclairage intérieur pour des applications telles que les objets connectés. Concrètement, ils ont développé un banc d'étalonnage équipé d'une nouvelle source à LED dont les spécifications se rapprochent de celles de l'illuminant L41 défini dans les normes de la Commission internationale de l'éclairage (CIE) pour la mesure de l'intensité lumineuse. Comme le précise

Jimmy Dubard, responsable du département Photonique au LNE, «avec cette nouvelle installation, il est possible d'étudier l'influence de l'intensité de la lumière, de son angle d'incidence, et de son caractère éventuellement modulé, ce qui se rapproche plus d'une situation réelle d'illumination.»

Le LNE a par ailleurs déterminé l'origine d'anomalies constatées par le laboratoire Certisolis dans le cadre de la mesure de l'influence de la température sur les performances de panneaux PV sous éclairage solaire. Une caméra thermique a permis de montrer que ces anomalies étaient liées à un refroidissement des attaches métalliques utilisées pour fixer les thermocouples sur les panneaux, plus lent que celui des panneaux. Les résultats de l'ensemble du projet contribueront à accélérer la pénétration du marché de ces technologies innovantes que représentent les cellules PV.

TENEUR EN EAU DE LA BIOMASSE : UN PARAMÈTRE CRITIQUE DE SON POUVOIR CALORIFIQUE

Pour encourager l'emploi de biocarburants liquides ou solides, il est notamment nécessaire de mesurer sur site industriel leurs propriétés énergétiques. C'était le but du projet européen BIOFOMET dans lequel le LNE-CETIAT s'est attelé à mesurer leur teneur en eau, cruciale pour accéder au pouvoir calorifique.

L'équipe du LNE-CETIAT, en collaboration avec l'Institut Fresnel de Marseille, ont développé un instrument pour mesurer sur site l'humidité dans les solides, objet d'une thèse de doctorat. Cet instrument de transfert permettra de raccorder les instruments industriels aux instruments étalons de laboratoire, au LNE-CETIAT. Son principe repose sur la mesure du déplacement de fréquence de résonance (micro-onde) d'une cavité cylindrique, à vide puis chargée avec un échantillon. Cet

écart de fréquence permet de calculer la permittivité diélectrique de l'échantillon et, une fois le dispositif raccordé aux étalons d'humidité, il permet de mesurer sur site sa teneur en eau. Comme l'indique le doctorant Bayan Tallawi, «cet instrument, très rapide à mettre en œuvre, permet d'étalonner, par comparaison sur site, les instruments industriels, et évite ainsi les problèmes de transport et de conservation d'échantillons pour vérifier les mesures.»

La fonctionnalité de cet instrument a été démontrée sur un site industriel danois en y étalonnant un dispositif de mesure sur des plaquettes de bois et des granulés. L'incertitude de cet étalonnage est de l'ordre de 4 % et la traçabilité au SI de la mesure industrielle ainsi est garantie.



MISE EN ŒUVRE DE L'INSTRUMENT DE MESURE DE L'HUMIDITÉ DANS LES SOLIDES SUR SITE INDUSTRIEL.

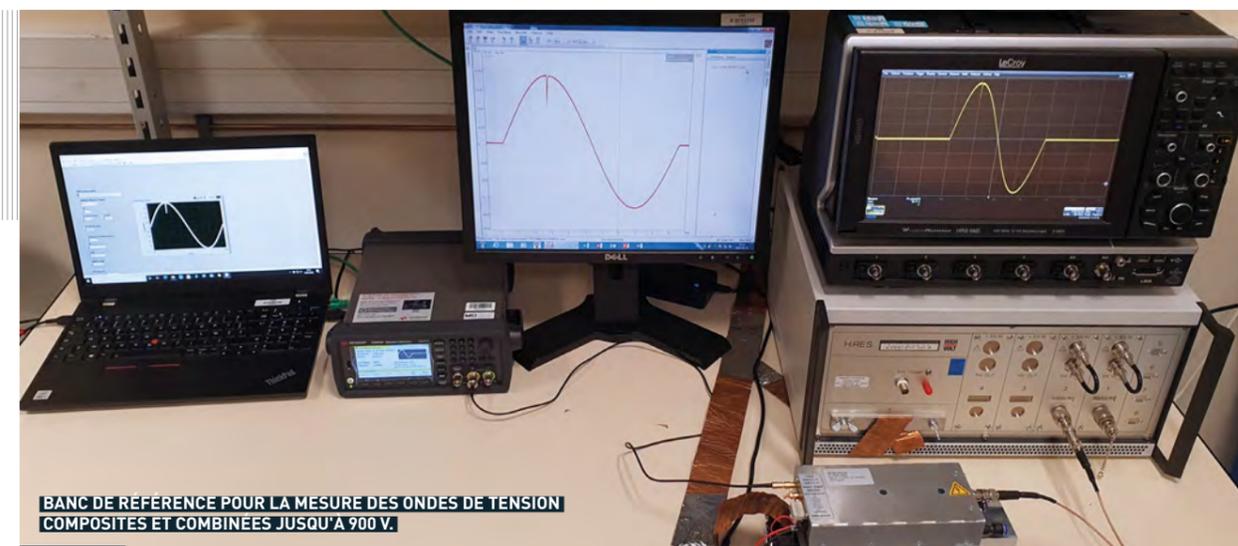
MÉTROLOGIE DE L'HYDROGÈNE POUR ACCÉLÉRER LA DÉCARBONATION DES TRANSPORTS LOURDS

L'hydrogène constitue l'une des solutions de décarbonation du secteur des transports, en particulier du transport lourd (cars, camions, trains ou avions). Afin d'accélérer le déploiement européen des stations de recharge de ces véhicules, il convient de développer la métrologie pour les contrôler (qualité et quantité). C'est chose faite grâce au projet européen MetroHyVe-2, terminé en 2023, dont le laboratoire de débitmétrie du RNMF, LNE-LADG, était partenaire.

Dans un premier temps, les métrologues français ont participé à une comparaison interlaboratoire dans le but de valider le banc primaire mobile de débitmétrie qu'ils avaient développé au cours du précédent projet. «Ce dispositif gravimétrique est le premier banc primaire de sa catégorie à avoir été certifié ISO 17025 en Europe pour l'étalonnage en débitmétrie, se félicite Rémy Maury, responsable R&D du LNE-LADG. Ces résultats

valident notre capacité d'étalonnage en débitmétrie avec une incertitude de 0,2 % qui pourra être inscrite dans la base de données (CMC) du BIPM.»

Dans un second temps, les chercheurs ont mis au point un étalon secondaire fondé sur l'effet Coriolis, adapté aux débits élevés des stations pour véhicules lourds. «Notre savoir-faire s'est porté sur la mise en place d'un système permettant d'utiliser ce débitmètre dans des conditions adaptées, notamment en le mettant à la température de l'hydrogène délivré, souvent -40 °C, avant utilisation», poursuit le chercheur. Une fois étalonné sur le banc primaire, ce nouveau moyen permet d'étalonner rapidement les compteurs des sites distributeurs, avec une incertitude inférieure à 0,5 %, couvrant ainsi l'ensemble des besoins actuels.



BANC DE RÉFÉRENCE POUR LA MESURE DES ONDES DE TENSION COMPOSITES ET COMBINÉES JUSQU'À 900 V.

ESSAIS À HAUTE TENSION : DES NORMES POUR FIABILISER LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Afin de garantir la fiabilité des réseaux de haute tension de plus en plus complexes, il est nécessaire d'accroître les essais d'équipements diélectriques installés sur ces réseaux. C'était l'objectif du projet européen HV-com² achevé en 2023, dans lequel le LNE a contribué à la mise en place de la traçabilité de mesure des ondes de tension composites et combinées. Des ondes impulsionnelles, superposées aux signaux transmis par le réseau, peuvent entraîner des dysfonctionnements de ce dernier. Afin de tester leurs effets sur les équipements en testant leur niveau d'isolement, les métrologues ont développé des systèmes de mesure de ces ondes et les algorithmes de traitement des mesures.

En outre, le LNE a développé un calibrateur de basse tension traçable au SI. Fondé sur un amplificateur linéaire, ce dispositif

permet de générer des signaux pour étalonner les enregistreurs numériques utilisés pour mesurer ces ondes complexes. «Là où il n'y avait aucune traçabilité, nous l'assurons désormais jusqu'à 900 V avec une incertitude de mesure de 0,2 % pour l'amplitude et de 1 % pour les paramètres temporels», explicite Hanane Saadeddine, ingénieure en métrologie électrique au LNE.

À l'issue du projet, le consortium a fourni des recommandations, au meilleur état de l'art des mesures de hautes tensions composites et combinées, au comité technique TC 42, lui permettant de réviser la norme IEC 60060 relative aux essais à haute tension dont une version révisée a été publiée dès 2023. Le LNE poursuit ses développements aux termes desquels il pourra effectuer des étalonnages avec ces ondes de tension jusqu'à 1 MV.

LA PAROLE À... THIERRY MICAND,

DIRECTEUR GÉNÉRAL DE VETTINER.

L'ENTREPRISE VETTINER PROPOSE DES INSTRUMENTS DE GRANDE PRÉCISION POUR CARACTÉRISER DES ÉQUIPEMENTS ET MATÉRIAUX ISOLANTS UTILISÉS DANS LE SECTEUR DE L'ÉLECTRICITÉ DE HAUTE TENSION. ENTREtenant DES LIENS FORTS AVEC LE LNE DEPUIS 20 ANS, ELLE A RÉCEMMENT PARTICIPÉ, À SES CÔTÉS, AU PROJET EUROPÉEN FUTURE-ENERGY SUR LA FIABILITÉ ET LA SÉCURITÉ DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.



«C'EST TRÈS APPRÉCIABLE QUE LE LNE SOUTIENNE DES PME COMME LA NÔTRE AFIN D'AIDER À MAINTENIR UN NIVEAU D'EXCELLENCE DE CLASSE MONDIALE.»

qualité nous a certes rendus éligibles, mais c'est bien par le LNE que nous avons été mis en relation avec l'association européenne EURAMET qui élabore des programmes de recherche en métrologie.

Qu'avez-vous concrètement réalisé au cours du projet FutureEnergy ?

T.M. : Ce projet a été pour nous l'occasion de développer notre nouvelle gamme de condensateurs et notamment d'améliorer leurs performances, en particulier leur linéarité, c'est-à-dire le fait que leur capacité soit la plus constante possible sur toute leur gamme d'utilisation en tension. Dans un premier temps, nous avons travaillé avec le LNE pour caractériser la linéarité d'un condensateur jusqu'à 100 kV. Pour ce faire, le laboratoire nous a apporté son savoir-faire méthodologique sur la partie mesure, de la définition des besoins à leur mise en œuvre. Les résultats obtenus ont été très satisfaisants. À la suite, les caractérisations jusqu'à 800 kV ont été réalisées au PTB, le laboratoire national de métrologie allemand.

Quel bilan général tirez-vous de votre participation au projet FutureEnergy et comment envisagez-vous la suite de votre collaboration avec le LNE ?

T.M. : Outre son intérêt scientifique et technologique, le projet européen nous a permis de nous faire connaître auprès d'autres laboratoires nationaux de métrologie dont certains nous ont commandé des condensateurs. C'est très appréciable que le LNE soutienne des PME comme la nôtre afin d'aider à maintenir un niveau d'excellence de classe mondiale. Nous poursuivons nos échanges avec Mohamed Agazar et son équipe, avec probablement des études communes à venir sur le comportement de matériaux pouvant se dégrader sous l'effet d'impulsions courtes de haute tension et induire une détérioration d'équipements des réseaux électriques.

Vous avez participé avec le LNE au projet européen FutureEnergy finalisé en 2023, quel était son objectif ?

Thierry Micand : Les objectifs de ce projet s'inscrivaient dans la problématique d'assurer la fiabilité et la sécurité des réseaux électriques. Concrètement, il s'agissait d'étendre les capacités d'étalonnage des laboratoires nationaux de métrologie en tension continue jusqu'à 2 MV et en tension impulsionnelle jusqu'à 4 MV, et d'améliorer les techniques de mesure en tension alternative jusqu'à 800 kV.

Comment avez-vous intégré le consortium de ce projet ?

T.M. : Fondée en 1933, l'entreprise Vettiner conçoit et fabrique des instruments de mesure dans le domaine de la haute tension pour caractériser des matériaux, milieux diélectriques et équipements électriques. C'est un marché d'«ultra-niche» et nos clients sont principalement des laboratoires nationaux de métrologie, des laboratoires d'essais et des entreprises du secteur de l'énergie et de son transport. De ce fait, nous avons des liens avec le LNE depuis une vingtaine d'années, celui-ci étant pour nous à la fois un prestataire et un client. Ainsi, c'est dans ce cadre d'échanges réguliers que Mohamed Agazar, ingénieur en électricité haute tension au LNE, a proposé à mon prédécesseur d'intégrer le consortium mis en place pour le projet FutureEnergy. Notre réputation de





SANTÉ ET SÉCURITÉ DES CITOYENS

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE, POLLUTION ENVIRONNEMENTALE, TOXICOLOGIE
DES NOUVEAUX MATÉRIAUX UTILISÉS, EXAMENS OU TRAITEMENTS MÉDICAUX...
LA SANTÉ ET LA SÉCURITÉ DES CITOYENS EXIGENT UNE MÉTROLOGIE ADAPTÉE À CES PROBLÉMATIQUES.
CE DONT LE LNE ET LE RNMF S'ASSURENT TOUS AZIMUTS.

MESURES INFRASONORES : LEUR TRAÇABILITÉ AU SI ASSURÉE JUSQU'À 10 mHz

L'ACOUSTIQUE INFRASONORE, TOUT COMME LA SISMOLOGIE À BASSE FRÉQUENCE, SONT DES TECHNIQUES UTILISÉES POUR DÉTECTER LA SURVENUE D'EXPLOSIONS NUCLÉAIRES. LES MESURES DE SURVEILLANCE RÉALISÉES DANS LE MONDE ENTIER, DANS L'AIR, SOUS TERRE ET EN MER, SONT DÉSORMAIS TRAÇABLES AU SI, RENFORÇANT AINSI LEUR FIABILITÉ.

Le respect du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE ou CTBT, Nations Unies, 1996) est contrôlé par le Réseau mondial de surveillance mis en place pour détecter toute éventuelle explosion quelque part dans le monde. Ce sont des stations sismiques pour déceler des explosions souterraines, des hydrophones pour les explosions sous-marines et des microbaromètres pour enregistrer les variations de la pression atmosphérique. Pour ces trois types de détection, les fréquences des phénomènes concernés sont inférieures à 4 Hz. Or jusqu'à récemment, il n'existait aucun moyen d'assurer la traçabilité au SI de ces mesures aux fréquences inférieures à 2 Hz. Y parvenir, et ainsi conférer à ces mesures une valeur légale incontestable, était l'enjeu du projet européen Infra-AUV, finalisé en 2023 et auquel le LNE a pris une large part. Comme le résume Dominique Rodrigues, au LNE, «*le fil directeur de l'ensemble du projet était d'apporter de la traçabilité au SI aux mesures réalisées sur site par le développement d'une chaîne complète de traçabilité métrologique.*»

Les métrologues français ont eu pour tâche principale le pilotage et une forte implication dans le lot du projet dont la finalité était d'établir des étalons primaires et des méthodes d'étalonnage, différents selon les laboratoires nationaux de métrologie impliqués. Les experts du LNE se sont concentrés sur les mesures acoustiques infrasonores. Ils ont développé un banc d'étalonnage mettant en œuvre un pistonphone laser. Composé d'une cavité close munie d'un piston, il permet de produire une pression acoustique de fréquence inférieure à 20 Hz. Elle est évaluée à partir du débit volumique du piston mesuré par interférométrie laser et de l'impédance acoustique de la cavité déterminée par modélisation.

Si le développement de la nouvelle installation avait commencé avant ce projet, celui-ci a permis d'en améliorer les performances. Une série d'étalonnages d'un microphone de référence et d'un capteur de pression statique réalisés avec le nouveau banc et avec d'autres moyens ont montré que le pistonphone de référence du LNE permet d'étalonner des microphones aux fréquences situées entre 10 mHz et 20 Hz, avec une incertitude de 0,03 dB en amplitude et 0,2° en phase, entre 1 Hz à 20 Hz, qui augmente respectivement à 0,1 dB et 1° aux fréquences les plus basses.

À la suite, le LNE a piloté une comparaison interlaboratoire impliquant quatre laboratoires nationaux, qui a démontré notamment la robustesse de l'approche française. Également impliqués dans le projet européen, les chercheurs de l'équipe «Longueur» du LNE-Cnam ont quant à eux montré qu'il est possible de mesurer



Trois questions à...

DOMINIQUE RODRIGUES,

RESPONSABLE DU DÉPARTEMENT ACOUSTIQUE ET VIBRATION

Avec ce nouveau pistonphone, le LNE dispose d'une référence primaire unique au monde pour l'étalonnage infrasonore.

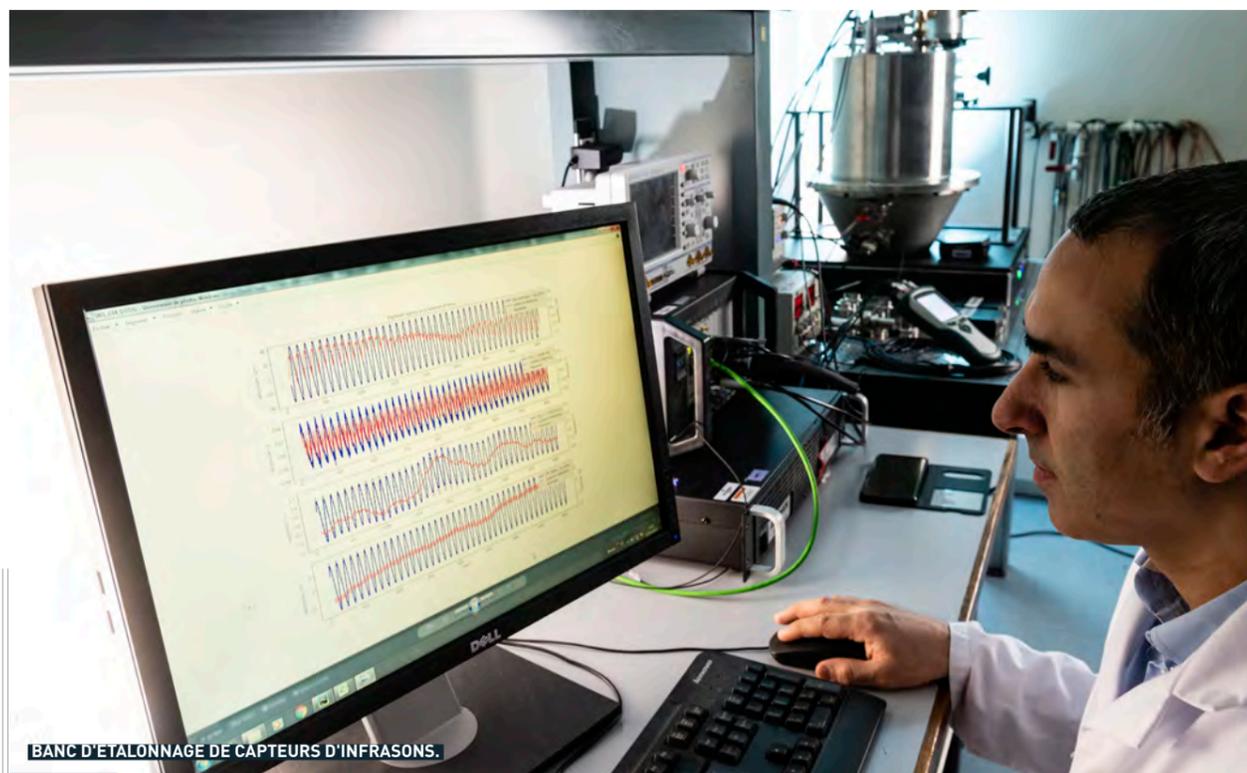
Dominique Rodrigues : En effet, notre pistonphone réalise le «Pascal acoustique» avec lequel il est possible d'étalonner des capteurs dans une gamme de fréquence que nous sommes les seuls à couvrir. Il permet d'atteindre 10 mHz quand nos partenaires danois, dont l'installation de référence a également démontré des performances intéressantes, n'est qualifiée que jusqu'à 25 mHz. Nous avons ainsi déjà étalonné des capteurs y compris pour des clients des États-Unis.

Le projet auquel vous avez participé était motivé par les activités relatives au Traité TICE. Ses retombées vont-elles au-delà ?

D.R. : Oui, car les stations de mesure sismique et acoustique, infrasonore et sous-marine utilisées pour la surveillance du respect du Traité sont également utilisées par les géophysiciens pour la surveillance de l'activité terrestre (séismes, tsunamis, activités volcaniques...), pour la prévision météorologique et l'étude des impacts du changement climatique. Toutes ces disciplines vont donc en tirer profit.

Quelles seront les retombées du projet pour le LNE ?

D.R. : La nouvelle installation de référence offre la possibilité de nouvelles prestations d'étalonnage. Afin de les faire connaître, nous avons fait une demande d'accréditation COFRAC et allons également déposer une demande d'inscription d'une nouvelle aptitude de mesure (CMC) dans la base de données du BIPM. J'ajoute que nous terminons une proposition pour la rédaction d'une norme sur l'étalonnage de capteurs acoustiques infrasonores qui sera bientôt soumise à la CEI.



BANC D'ÉTALONNAGE DE CAPTEURS D'INFRASONS.

une pression acoustique à basse fréquence à partir de la mesure de l'indice de réfraction de l'air. Par ailleurs, pour le volet sismologique du projet, le LNE a participé à la caractérisation d'un banc primaire sismique développé par une équipe du CEA-DAM. «À l'aide de notre référence primaire d'accélérométrie, étendue jusqu'à 0,1 Hz dans le cadre de ce projet, nous avons étalonné des accéléromètres du banc de mesure sismique du CEA», précise Dominique Rodrigues.

La deuxième partie du projet a consisté à développer des moyens de dissémination de ces références primaires, en commençant par la sélection et l'étalonnage d'étalons de transfert. Sur ce segment, les métrologues du LNE ont étalonné un microphone infrasonore utilisé comme référence par le CEA pour l'étalonnage des microbaromètres des stations de mesure. Également dans la boucle, l'équipe de Mathématiques et Statistiques du LNE a *in fine* établi le bilan d'incertitude de mesure au niveau d'une station de surveillance. Se fondant sur une modélisation par méthode de Monte-Carlo qui intègre toute l'architecture de mesure – les microbaromètres et les réseaux de filtrage – les

théoriciens ont évalué, qu'à 1 Hz, l'incertitude de mesure est 0,3 dB. «Alors qu'il n'y avait aucune traçabilité métrologique des mesures infrasonores, grâce à ce projet, nous avons renforcé la confiance dans la détermination de l'énergie et de la localisation d'une éventuelle explosion», indique le scientifique. Des informations essentielles pour garantir la crédibilité des mesures sur lesquelles reposent des enjeux géopolitiques essentiels.



CHIFFRES CLÉS

Le pistonphone du LNE permet d'étalonner des capteurs acoustiques infrasonores avec une incertitude de 0,03 dB en amplitude et 0,2° en phase, entre 1 Hz et 20 Hz, et respectivement jusqu'à 0,1 dB et 1° aux fréquences inférieures. Le projet Infra-AUV a permis d'atteindre une incertitude de 0,3 dB à 1 Hz pour les mesures réalisées sur site.

ACCÉLÉRATEURS MÉDICAUX : LA CARACTÉRISATION PRÉCISE DE LEUR NIVEAU D'ACTIVATION REND POSSIBLE LEUR DÉMANTÈLEMENT

Le parc d'accélérateurs médicaux pour la radiothérapie s'élève à environ 150 en France et près de 4 000 en Europe. Quand ces machines arrivent en fin de vie ou sont remplacées par d'autres plus performantes, la question se pose du démantèlement et de l'avenir des matériaux activés qu'elles contiennent. Sollicité par l'Andra sur cette problématique, le LNE-LNHB a répondu par une étude métrologique poussée de la situation radiologique, finalisée l'année dernière. Le projet mené a consisté en une modélisation 3D permettant d'établir par calcul un bilan complet de l'état d'activation d'un ensemble d'accélérateurs d'électrons, représentatifs de l'ensemble de ces machines. Comme l'explique Valentin Blideanu, chercheur au laboratoire de dosimétrie du LNE-LNHB, «nous avons d'une part établi la nature du rayonnement engendré par l'interaction du faisceau avec les matériaux

de l'accélérateur, d'autre part celle des radioéléments produits par ce rayonnement qui sont in fine à l'origine de l'activité induite dans les déchets à traiter.»

Le résultat de ces calculs, validés par une étude expérimentale réalisée dans des faisceaux de neutrons au GANIL, accélérateur d'ions lourds situé à Caen, prend la forme d'une base de données. Pour une vingtaine de pièces constitutives des accélérateurs médicaux, elle contient les vingt radionucléides les plus contributeurs à leur activité, avec la nature et le niveau de cette dernière, entre une heure et 10 ans après l'arrêt de la machine et ce pour deux scénarios d'exploitation (cinq et dix ans). L'ensemble de ces informations permettra de mettre en place les filières adéquates de stockage et éventuellement de recyclage des déchets radioactifs, pour le démantèlement des accélérateurs de radiothérapie.

MÉTROLOGIE CHIMIQUE ADAPTÉE AUX COV PERTINENTS POUR LE SUIVI DU CLIMAT

Les composés organiques volatils (COV) sont des précurseurs de l'ozone et d'aérosols qui participent à l'effet de serre. Une compréhension fine des mécanismes de changement climatique nécessite la mise en place d'une infrastructure métrologique adaptée à la mesure de la concentration de ces éléments, très réactifs mais présents dans l'atmosphère à l'état de traces. C'était l'enjeu du projet européen MetClimVOC, terminé l'année dernière, auquel l'équipe de Métrologie des gaz du LNE a participé.

Les métrologues français ont eu pour tâche la production de mélanges gazeux étalons pour l'étalonnage d'appareils de mesure. Précisément, les gaz introduits dans les bouteilles sont du méthanol, acétone ou éthanol mélangé à de l'azote à une concentration de 100 nmol/mol.

L'enjeu du projet consistait ensuite à suivre l'évolution dans le temps de ces mélanges gazeux, conservés dans des contenants de natures différentes, afin de documenter leur stabilité. «Pour ce faire, nous avons développé une méthode de référence fondée sur une technique chromatographique étalonnée à partir d'une méthode de dilution dynamique», détaille Christophe Sutour, ingénieur chimiste au LNE.

La comparaison interlaboratoire réalisée avec les laboratoires nationaux hollandais et suisse a montré qu'il était difficile de garantir la stabilité du méthanol dans les mélanges gazeux. En revanche, les concentrations des composés tels que l'acétone ou l'éthanol se sont révélées très stables, permettant de les utiliser pour étalonner des instruments de mesure avec une incertitude de 5 %.



BANC D'ÉTALONNAGE DES COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILS (COV).

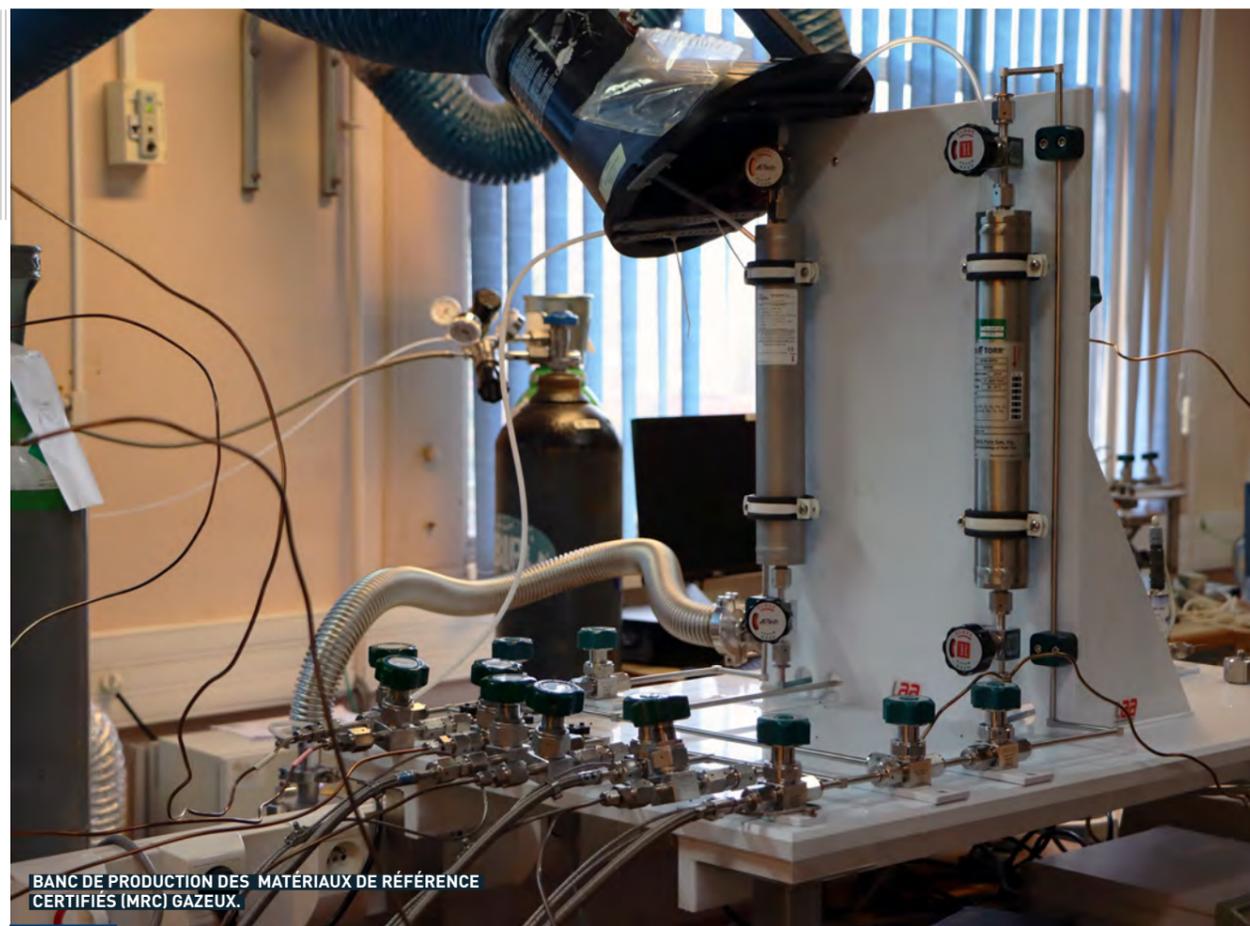
ÉMISSIONS POLLUANTES DES VÉHICULES : TRAÇABILITÉ AU SI DES ESSAIS SUR ROUTE

Les normes environnementales prévoient la réalisation d'essais sur route pour documenter les émissions polluantes des véhicules avant leur mise sur le marché. Les essais sont réalisés à partir de systèmes portables de mesure des émissions (PEMS) pour lesquels il était nécessaire de mettre en place une chaîne de traçabilité métrologique. C'est chose faite grâce au projet européen MetroPEMS auquel le LNE a participé.

Dans ce but, les chercheurs du LNE se sont focalisés sur la préparation de mélanges gazeux étalons de dioxyde d'azote (NO_2) dans l'air pour étalonner les systèmes de mesure. En parallèle, ils ont mis en place un moyen de mesure des très faibles concentrations – typiquement quelques dizaines de nmol/mol – d'acide nitrique (HNO_3) qui se forme au fil du temps dans ces mélanges étalons au contact de traces de

vapeur d'eau présentes. «*Nous avons pour ce faire mis en œuvre une technique de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier que nous avons étalonnée à partir d'un mélange gazeux de HNO_3 à 100 nmol/mol obtenu par perméation*», explicite Christophe Sutour, ingénieur en métrologie des gaz au LNE.

La nouvelle installation de référence a permis de montrer toute la difficulté d'assurer la stabilité à long terme de mélanges gazeux de dioxyde d'azote à $1 \mu\text{mol/mol}$ dans l'air. Pour y parvenir, le LNE s'est équipé d'une installation permettant de chauffer les bouteilles de gaz, et ainsi d'y éliminer toute trace de vapeur d'eau, avant introduction du mélange étalon. Elle sera mise en œuvre dans le futur projet mené en collaboration avec le BIPM.



BANC DE PRODUCTION DES MATÉRIAUX DE RÉFÉRENCE
CERTIFIÉS (MRC) GAZEUX.

LA PAROLE À...

GUILLAUME LEMAHIEU, INGÉNIEUR APPLICATION R&D CHEZ MITROTRAC

DANS LE CADRE D'UN PROJET DE RECHERCHE, L'ENTREPRISE MITROTRAC ET LE LNE ONT RÉALISÉ DES MESURES DIMENSIONNELLES DE NANOPARTICULES DE DIOXYDE DE TITANE ET CARACTÉRISÉ LA STABILITÉ DE SUSPENSIONS COLLOÏDALES, DANS LE BUT DE DÉFINIR LES MEILLEURS PROTOCOLES DE TESTS TOXICOLOGIQUES À RÉALISER SUR DES PRODUITS CONTENANT DES NANOPARTICULES.



Quel était l'objectif de votre collaboration avec le LNE ?

Guillaume Lemahieu : De nombreux produits pharmaceutiques ou cosmétiques contiennent des nanoparticules, en particulier des nanoparticules de dioxyde de titane (TiO_2) classées comme potentiellement cancérigènes par l'Anses. Ainsi, ces produits doivent être soumis à des tests toxicologiques avant mise sur le marché.

Or du fait de problématiques de sédimentation, d'agrégation ou d'interaction entre les particules et la matrice où elles sont dispersées, la stabilité des échantillons sur lesquels ces tests sont réalisés n'est pas garantie.

Le projet réalisé avec le LNE visait donc à étudier la stabilité de suspensions de nanoparticules de TiO_2 en vue de proposer des guides de bonnes pratiques permettant de réaliser ces tests dans les meilleures conditions.

Comment s'est faite votre rencontre avec le LNE ?

G.L. : Notre entreprise est leader sur le marché de la caractérisation de formulations opaques (émulsions, suspensions ou mousses) par une technique non-invasive fondée sur la diffusion statique multiple de la lumière. Mise en œuvre dans un instrument appelé Turbiscan, celui-ci permet d'identifier quantitativement les mécanismes de déstabilisation (agrégation, sédimentation, crémage...) à travers l'enregistrement de la lumière transmise ou rétrodiffusée par l'échantillon *in situ*. Sur les solutions de nanoparticules de dioxyde de titane, nous avons des discussions avec le LNE depuis 2015 et avons déjà collaboré sur plusieurs projets. De fait, les moyens de caractérisation de nanoparticules du LNE sont complémentaires aux

nôtres, apportant des mesures raccordées au SI et permettant d'accéder à des paramètres analytiques complémentaires.

Concrètement, qu'avez-vous mis en œuvre au cours de ce nouveau projet ?

G.L. : Nous avons caractérisé la stabilité et les propriétés dimensionnelles de différentes populations de nanoparticules de TiO_2 , ayant subi différents traitements de surface et étant immergées dans différentes matrices : une solution aqueuse et différents milieux biologiques de référence. Pour chaque situation, nous avons déterminé la taille des nanoparticules, leur degré d'agglomération, leur dispersion et la façon dont elles sédimment. L'emploi de différentes techniques a permis de renforcer la confiance dans les données récoltées. Au terme de nos analyses, qui feront prochainement l'objet d'une publication scientifique, nous pouvons définir les protocoles les plus adaptés à la préparation d'échantillons stables en fonction du type de particules considéré, du type de tests envisagé, etc.

Ces travaux auront-ils une suite ?

G.L. : Nous avons des idées pour étendre nos analyses à d'autres types de nanoparticules, par exemple des nanoparticules d'oxyde de zinc, également présentes dans de nombreux produits cosmétiques. Plus généralement, nous collaborons très naturellement avec les chercheurs du LNE. Les projets réalisés avec eux permettent du reste de positionner nos instruments sur de nouveaux marchés. Cela nous a également permis d'étendre notre réseau, notamment en nous ouvrant les portes de l'association NanoMesureFrance.

MÉTROLOGIE FONDAMENTALE

LA MÉTROLOGIE EST À LA CROISÉE DU DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE, DE L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE ET DE LA RECHERCHE FONDAMENTALE. AINSI LE LNE ET LE RNMF DÉVELOPPENT-ILS DE NOUVEAUX ÉTALONS PRIMAIRES EN S'APPUYANT SUR DES AVANCÉES SCIENTIFIQUES DE POINTE. ILS RECHERCHENT ÉGALEMENT DE NOUVEAUX PRINCIPES DE MESURE POUR DISSÉMINER LES ÉTALONS EN ACCORD AVEC LE SI DE FAÇON À CE QUE TOUT CHANGEMENT S'OPÈRE SANS À-COUPS.

GRAPHITE PYROLYTIQUE : UN ATOUT POUR MESURER LA PUISSANCE D'UN FAISCEAU LASER

LES PROPRIÉTÉS DE LÉVITATION DU GRAPHITE PYROLYTIQUE EN FONT UN MATÉRIAU IDÉAL POUR RÉALISER DES PENDULES DE TORSION DE TRÈS FAIBLE RAIDEUR. LES MÉTROLOGUES DU LNE-CNAM ONT DÉMONTRÉ LA FAISABILITÉ DE LA MESURE DE PUISSANCE OPTIQUE AVEC QU'UN TEL DISPOSITIF.

En radiométrie, la référence nationale pour la mesure de flux énergétique (puissance optique d'un faisceau de lumière) est un radiomètre cryogénique. Fondé sur la comparaison directe de la puissance du rayonnement à une puissance électrique dissipée par effet Joule dans une résistance, il permet d'atteindre une incertitude relative de mesure de l'ordre de 5×10^{-5} . Pour autant, les mesures de puissance se dégradent rapidement (jusqu'à atteindre plus de 1 %) lorsqu'elles sont effectuées avec d'autres instruments de mesure, plus couramment utilisés tels les thermopiles (capteurs thermiques) ou les photodiodes (capteurs optiques). Pour faire face à la demande croissante d'étalonnage de ces instruments, il serait nécessaire de développer de nouvelles méthodes, plus performantes, pour mesurer la puissance optique d'un laser. C'était l'objet d'un projet de métrologie fondamentale mené par l'équipe «Masse et grandeurs apparentées» du LNE-Cnam et dont les résultats ont été présentés l'année dernière. Fondée sur la mesure de la pression de radiation exercée par une impulsion laser sur un système de type «balance de torsion», la nouvelle méthode s'est révélée prometteuse pour la photométrie, mais également pour la mesure de minuscules forces mécaniques.

Le principe du dispositif mis en œuvre repose sur les propriétés particulières du graphite pyrolytique. Composé de couches de graphène, ce matériau développé à partir des années 1960 est formé de feuillets de quelques millimètres d'épaisseur et possède des propriétés magnétiques remarquables. Doté d'un très fort diamagnétisme à température ambiante, il est «facile» d'en placer un feuillet en lévitation au-dessus d'un simple aimant permanent (néodyme fer bore).

Tirant partie de cette propriété, les métrologues ont proposé un montage expérimental pour mesurer la puissance optique d'un faisceau laser. Il consiste à positionner un feuillet de graphite pyrolytique stabilisé au-dessus d'un champ magnétique idéal, le rendant ainsi libre de tourner autour d'un axe vertical. Plus précisément, percé de petits trous à l'origine de légères anisotropies, le feuillet tend à retrouver une position d'équilibre une fois mis en rotation. Il réalise ainsi une balance de torsion de très faible raideur.

Équipée d'un axe horizontal au bout duquel se trouve un miroir, cette balance peut être mise en oscillation sous l'effet de la pression de radiation d'une impulsion laser. La puissance de cette dernière est alors déterminée par la mesure des caractéristiques du mouvement de la balance. «Une modélisation fine de notre système montre que la puissance énergétique de l'impulsion optique s'exprime comme une fonction de l'angle maximal de déplacement du feuillet, des paramètres caractérisant l'amortissement des oscillations et du moment d'inertie du



Trois questions à...

ZACCARIA SILVESTRI, INGÉNIEUR DE RECHERCHE

Comment est né votre intérêt pour le graphite pyrolytique ?

Z.S. : Vers 2017, mon collègue Patrick Pinot, retraité depuis 2019, a réalisé tout le potentiel de ce matériau eu égard à ses propriétés magnétiques extraordinaires. Nous travaillons dans le domaine de la métrologie mécanique et nous avons d'abord pensé à des applications pour des mesures de force ou de masse. Mais des discussions au sein du LNE-Cnam nous ont mis sur la piste des mesures de puissance optique pour initier ce projet auquel a également contribué Alain Vissière.

Quelles applications concrètes imaginez-vous pour votre dispositif ?

Z.S. : S'agissant d'un projet exploratoire, il est un peu tôt pour être catégorique. Mais nos collègues de l'équipe Radiométrie-Photométrie se sont montrés très intéressés par nos résultats. À terme, on peut imaginer que notre méthode vienne enrichir les capacités d'étalonnage du LNE-Cnam pour les mesures de puissance optique. Par ailleurs, avec le renfort de Simon Noviant, nous explorons désormais la possibilité de mesurer une force de très faible intensité grâce à un nouveau dispositif exploitant lui aussi les propriétés exceptionnelles du graphite pyrolytique.

Vous êtes également engagés dans un projet ANR pour des applications en biologie ?

Z.S. : En effet, nous débutons en mars 2024 en collaboration avec l'institut Femto-ST de Besançon, un projet pour étudier comment notre dispositif de mesure de force pourrait permettre d'étalonner les appareils utilisés en biologie médicale pour caractériser des ovocytes à partir de leurs propriétés mécaniques, avant leur implantation dans l'utérus pour une PMA. La médecine et la biologie sont vraisemblablement parmi les domaines où les besoins de mesures raccordées au SI de très faibles valeurs de force sont les plus prégnants.

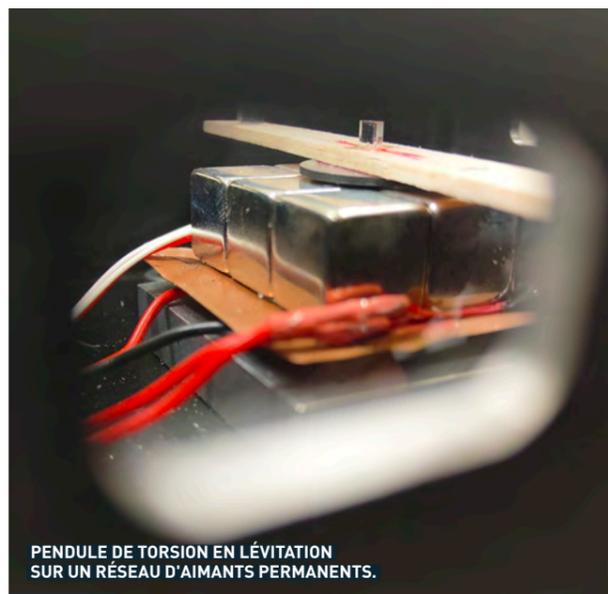


REGLAGE DU PENDULE DE TORSION.

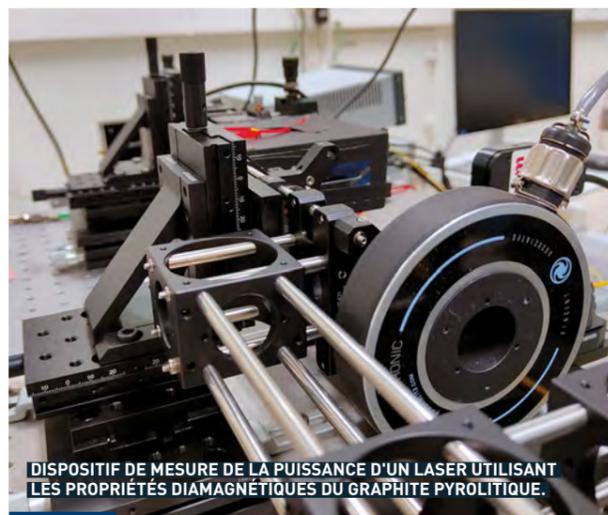
dispositif déterminé au préalable par des mesures raccordées à la masse et aux dimensions géométriques du dispositif», détaille Zaccaria Silvestri, chercheur en métrologie mécanique au LNE-CNAM et responsable du projet. Ainsi, la détermination expérimentale des paramètres associés aux oscillations permet d'accéder directement à la puissance optique du faisceau incident, raccordée ainsi aux unités SI de longueur, de masse et de temps.

Après une démonstration de principe réalisée en 2018, les spécialistes ont amélioré leur expérience. Par un contrôle fin de la dérive thermique due aux impulsions et de l'horizontalité du feuillet de graphite pyrolytique, et la réalisation d'un système optique permettant de s'abstraire de la mesure de la distance entre la photodiode et le miroir servant à la mesure de l'angle de déviation, ils sont ainsi parvenus à réaliser des mesures dont l'incertitude relative est inférieure à 1%. «La principale source d'incertitude est la mesure de l'angle maximal de rotation, affectée par les vibrations résiduelles», indique le chercheur.

Afin de finaliser le bilan d'incertitude, les scientifiques doivent encore comparer leur résultat avec celui d'une mesure sur un laser étalonné et mieux stabilisé que celui utilisé initialement. Pour autant, ils ont montré que leur nouvelle méthode de mesure de la puissance optique est une alternative crédible à celles réalisées avec une thermopile ou une photodiode. Si les applications à la photométrie sont a priori les plus évidentes, les métrologues ont déjà étudié l'année passée une nouvelle configuration de leur expérience où un aimant est pris en sandwich entre deux feuillets de graphite pyrolytique en position verticale. Ils ont ainsi construit un fléau avec lequel il est possible de mesurer, en principe, des forces mécaniques comprises entre 0,1 et 100 nN, alors même qu'il n'existe à l'heure actuelle aucune façon satisfaisante d'étalonner un dynamomètre pour de si faibles forces. Un autre projet, débuté l'année dernière, vise la mise au point d'une telle mesure avec une incertitude cible de l'ordre de 1%.



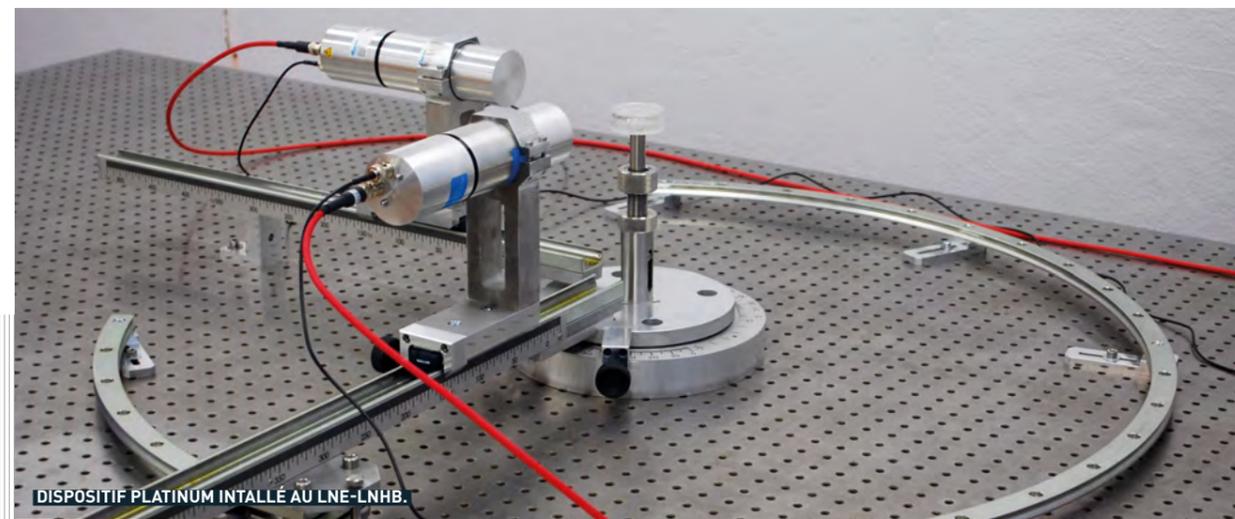
PENDULE DE TORSION EN LÉVITATION SUR UN RÉSEAU D'AIMANTS PERMANENTS.



DISPOSITIF DE MESURE DE LA PUISSANCE D'UN LASER UTILISANT LES PROPRIÉTÉS DIAMAGNÉTIQUES DU GRAPHITE PYROLYTIQUE.

CHIFFRES CLÉS

La balance de torsion fondée sur les propriétés magnétiques du graphite pyrolytique (PyC) mise au point au LNE-CNAM permet la mesure de puissance optique d'impulsions laser avec une incertitude inférieure à 1% et avec une résolution de quelques dizaines de milliwatts pour des puissances entre 100 mW et 5 W. Cette même incertitude est la cible d'autres développements, déjà engagés, exploitant le PyC pour mesurer une force de quelques nanonewtons.



DISPOSITIF PLATINUM INTALLÉ AU LNE-LNHB.

SCHÉMAS DE DÉSINTÉGRATION DES RADIONUCLÉIDES : UNE PLATEFORME POUR LES AFFINER

Les schémas de désintégration de certains radionucléides sont mal connus. Or la détermination métrologique de leur activité en dépend. Pour pallier ce manque, le LNE-LNHB a conçu une nouvelle plateforme modulable, PLATINUM, destinée à couvrir l'ensemble des besoins comme l'utilisation de plusieurs types de capteurs. Précisément, ce banc instrumenté permet de déterminer les corrélations angulaires de l'émission gamma-gamma de sources radioactives. Pour ce faire, «PLATINUM offre la possibilité de faire varier, à un dixième de degré près, l'angle avec lequel deux détecteurs, spectromètres gamma à base de scintillateurs, sont positionnés par rapport à la source», expose Sylvain Leblond, chercheur au laboratoire de métrologie de l'activité du LNE-LNHB. L'électronique numérique de détection associée

permet de détecter simultanément, à 1 ns près, l'arrivée en coïncidence des photons.»

Désormais, grâce à la connaissance des paramètres relatifs aux processus quantiques à l'œuvre au sein du noyau, les métrologues pourront tirer meilleur parti des données de spectroscopie gamma, en ayant moins recours à des calculs théoriques ou semi-empiriques, pour établir plus précisément les schémas de désintégration d'un plus grand nombre de radionucléides. Actuellement les métrologues réalisent des mesures de validation de la plateforme en utilisant une source de cobalt-60 très bien connue. Le développement se poursuit qui permettra de coupler deux types de détecteurs, par exemple photons-électrons, pour des mesures spécifiques et même des mesures primaires d'activité.

ÉTALON QUANTIQUE DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE EN GRAPHÈNE : FIABILITÉ ET FACILITÉ DE MISE EN ŒUVRE

Le graphène est un candidat très prometteur pour la réalisation de l'étalon quantique de résistance et pour la dissémination plus large des références électriques. Le projet de recherche mené dans l'équipe de métrologie électrique fondamentale du LNE, clos en fin d'année dernière, visait à simplifier la mise en œuvre de l'étalon à l'effet Hall quantique avec le graphène, tout en gardant le meilleur niveau d'incertitude.

Lors de projets précédents, les métrologues du LNE avaient démontré le potentiel du graphène pour accéder à l'effet Hall quantique à un champ magnétique plus faible et une température plus élevée par rapport à l'arséniure de gallium (AsGa) utilisé jusqu'à présent.

Fort de cette preuve de concept, ils ont collaboré avec le CNRS pour fiabiliser la technologie de fabrication d'échantillons à base

de graphène. «Notre procédé permet une réalisation de l'effet Hall quantique à un champ magnétique inférieur à 5 T et à une température supérieure à 4 K, contre 10 T et 1,5 K dans des structures à base d'AsGa», se félicite Mathieu Taupin, chercheur de l'équipe projet.

En parallèle, ils ont travaillé à mettre en place un nouveau système cryomagnétique à tubes à gaz pulsés, sans les contraintes d'utilisation d'hélium liquide. «Tout l'enjeu était de montrer que les vibrations engendrées par ce type de système n'entraînaient pas la qualité des mesures», explique son collègue François Couëdo.

Ceci étant fait, les scientifiques visent désormais à étendre les applications des étalons en graphène en développant un étalon quantique d'impédance, tout en poursuivant leur contribution à l'essor des technologies quantiques en général.

APPROBATION DE UTC «CONTINU» POUR L'ÉCHELLE DE TEMPS DE RÉFÉRENCE LORS DE LA CONFÉRENCE MONDIALE DES RADIOCOMMUNICATIONS DE 2023

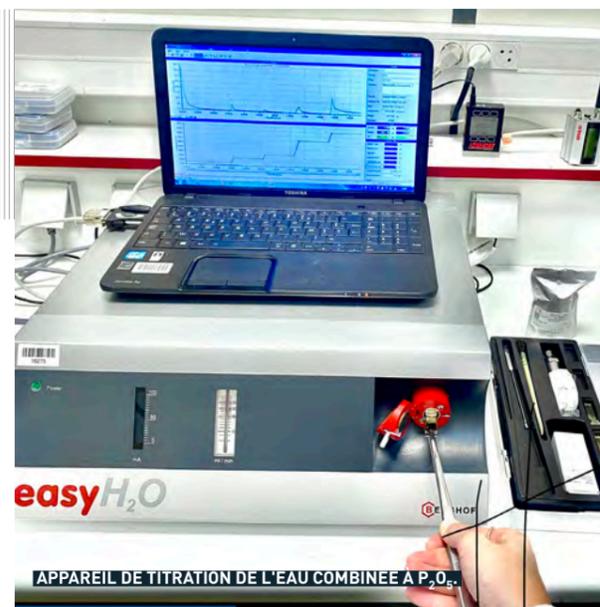
« C'est l'aboutissement de 23 ans de travail », résume Joseph Achkar, chercheur dans l'équipe des Références de temps au LNE-SYRTE. La Conférence mondiale des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT), qui s'est tenue du 20 novembre au 15 décembre dernier à Dubaï, a approuvé l'adoption et la mise en œuvre du Temps universel coordonné (UTC) «continu» comme l'échelle de temps de référence recommandée au niveau international. L'idée de supprimer les secondes dites intercalaires vise à éviter les risques de dysfonctionnement d'infrastructures numériques liés à la compensation de l'écart entre UTC fondé sur le Temps atomique international (TAI) et UT1 calculé à partir de la rotation de la Terre dont l'évolution à long terme est non prédictible. Émise dès l'an 2000, soutenue dès l'origine par le LNE-SYRTE contributeur majoritaire au calcul du TAI, et officiellement portée par plusieurs pays dont la France, la proposition n'a pourtant fait

l'objet d'aucun consensus jusqu'à 2023.

La situation s'est débloquée en 2022 avec l'adoption par la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) de la suppression des secondes intercalaires, pour effet au plus tard en 2035. Restait à l'UIT, qui décide du format de diffusion des signaux horaires, à se mettre en cohérence avec cette Résolution 4 de la 27^e CGPM. C'est désormais chose faite, en particulier grâce à l'important travail réalisé par le Groupe de travail 7A de l'UIT-R, présidé par Joseph Achkar, dont le rapport UIT-R TF.2511 sur l'UTC a permis de faire converger toutes les parties prenantes. La 28^e CGPM, en 2026, pourra adopter la nouvelle tolérance maximale entre UT1 et UTC proposée par la communauté des métrologues ainsi que la date d'application de l'UTC continu. L'année suivante, l'Assemblée des radiocommunications de l'UIT pourra adopter le nouveau format des signaux horaires à diffuser, défini par son Groupe de travail 7A.



CONFÉRENCE MONDIALE DES RADIOCOMMUNICATIONS DE L'UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS (UIT) - DUBAÏ, 20/11-15/12/2023.



APPAREIL DE TITRATION DE L'EAU COMBINÉE À P₂O₅.



APPAREIL DE TITRATION DE L'EAU DE TYPE KARL FISCHER, AU LNE-CETIAT.

MESURE D'HUMIDITÉ DANS LES SOLIDES, DÉSORMAIS TRAÇABLE AU SI

En France, aucun laboratoire ne dispose d'une accréditation COFRAC pour étalonner des instruments de mesure de l'humidité dans les solides. Cette situation entraîne un déficit de traçabilité au SI des mesures industrielles dans ce domaine. Pour y remédier, le LNE-CETIAT, en charge des références d'hygrométrie au sein du RNMF, a mené ces dernières années un important travail pour développer une instrumentation primaire spécifique à cette mesure. Plusieurs méthodes permettent de mesurer l'humidité dans les solides. Les méthodes chimiques consistent le plus souvent en une titration de l'eau par une réaction chimique sélective, de type Karl Fischer, après extraction de l'eau de la matrice solide, par exemple par évaporation par chauffage. L'électrolyse de l'eau combinée à du pentoxyde de phosphore permet aussi d'estimer la quantité d'eau. Une autre méthode consiste à extraire l'eau de l'échantillon solide et à déterminer la quantité extraite par pesée de l'échantillon avant et après extraction, méthode gravimétrique donc. Le LNE-CETIAT s'est alors équipé d'une instrumentation mettant en œuvre ces trois types de mesure de la quantité d'eau. «À l'issue d'une méticuleuse caractérisation métrologique de ces nouveaux bancs, le laboratoire peut désormais réaliser des mesures d'humidité dans des solides, traçables au SI, avec une incertitude de l'ordre de 2 à 4 %», détaille Eric Georgin, responsable du pôle thermodynamique du CETIAT. Cette possibilité ouvre la voie aux étalonnages d'humidimètres et à l'optimisation de procédés industriels, comme le séchage, essentiels pour le stockage de matériaux de construction ou de denrées agricoles.

THÈSES DE DOCTORAT SOUTENUES EN 2023

LNE

Saïf Khan

9 janvier 2023
«Standard measurement system for SI traceable measurement of high voltage pulses up to 500 kV in the nanosecond and sub-nanosecond range»
Université Paris-Saclay (CentraleSupélec, Gif-sur-Yvette), Génie électrique

Julien Kermorvant

21 mars 2023
«Concept d'empreintes chimiques appliqué à la gestion du risque chimique des matériaux, gisements recyclés et emballages alimentaires»
Université Paris6Saclay (AgroParisTech, Palaiseau), Chimie

Maxence Derbez-Morin

18 septembre 2023
«Développement de méthodes de quantification de biomarqueurs de diagnostic du sepsis par spectrométrie de masse»
Université Paris-Saclay (Gif-Sur-Yvette), Chimie

Lucas Fournet-Fayard

10 octobre 2023
«Étude métrologique de l'influence des paramètres du procédé sur les propriétés géométriques et dimensionnelles des pièces fabriquées par fusion laser sur lit de poudre»
Université Paris Saclay (AgroParisTech, Palaiseau), Chimie

Paul Monchot

16 octobre 2023
«Quantification d'incertitudes au sein des réseaux de neurones : Application à la mesure automatisée de la taille de particules de TiO₂»
Institut Polytechnique de Paris (Palaiseau), Mathématiques appliquées

LNE-CNAM

Thomas Labardens

11 janvier 2023
«Métrologie de l'apparence : Étude du speckle dans les mesures de BRDF à très haute résolution angulaire»
HESAM Université (Cnam, Paris), Optique/Lasers, Nanosciences et Métrologie

Amazigh Rezki

11 décembre 2023
«Développement et caractérisation d'un réfractomètre de type Fabry-Perot pour la mesure de la pression d'un gaz»
Paris HESAM (Cnam, Paris), Lasers, nanosciences et métrologie

LNE-CETIAT

Bayan Tallawi

28 avril 2023
«Développement d'une infrastructure métrologique française pour assurer la traçabilité au SI des mesures d'humidité dans les solides»
Aix Marseille Université (Marseille), Physique & Sciences de la matière, Instrumentation

LNE-LNHB

Stéphanie Melhem

25 septembre 2023
«Reference-free combined analysis GIXR-FXRR for the characterization of thin film materials and uncertainties calculation»
Université Paris-Saclay (Orsay), Physique des particules

Arshjot Kaur

10 novembre 2023
«Measurement of nuclear decay data for beta decay and electron capture using metallic magnetic calorimeters»
Université Paris Saclay (Orsay), Physique nucléaire

LNE-LTFB

Anthony Gusching

19 octobre 2023
«Référence de fréquence optique à microcellule à vapeur de césium stabilisée par spectroscopie sub-Doppler bi-fréquence»
Université Bourgogne Franche-Comté (Besançon), Sciences pour l'Ingénieur et microtechniques

Clément Carlé

24 novembre 2023
«Horloge atomique microonde à technologie de microcellule améliorée et régime d'interrogation impulsif»
Université Bourgogne Franche-Comté (Besançon), Sciences pour l'Ingénieur et microtechniques

LNE-LADG

Bruno Zebrowski

16 mars 2023
«Étude de la transition laminaire-turbulente de couches limites dans les tuyères soniques de débitmétrie»
ISAE-ENSMA (Poitiers), Mécanique des milieux fluides

LNE-SYRTE

Jérémie Cotxet

7 février 2023
«Vers une horloge compacte à piégeage cohérent de population du césium : source laser bifréquence bipolarisation et banc optoélectronique miniature»
Université PSL (Paris), Physique

Luc Absil

27 mars 2023
«Vers une mesure de l'effet Casimir à l'aide d'un interféromètre à atomes ultrafroids piégés»
Université PSL (Paris), Physique

Alberto De La Paz Espinosa

27 octobre 2023
«Improving and atomic clock on a chip via spin squeezing»
Sorbonne Université (Paris), Physique

Mohamed Guessoum

30 octobre 2023
«Improving the stability and accuracy of a cold atom gyroscope using real-time control methods»
Sorbonne Université (Paris), Physique

Alexis Mehlman

23 novembre 2023
«Développement d'un système lasers stabilisés en fréquence, compact, fibré, à vocation transportable»
Sorbonne Université (Paris), Physique

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES (HDR) OBTENUE EN 2023

LNE

François Gaie-Levrel

13 juin 2023
«Développement de la métrologie des aérosols pour la qualité de l'air, les nanotechnologies et la santé»
Université Paris-Est (Créteil), Sciences et Techniques de l'Environnement

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 : LNE - Mars 2024

Crédits photos : Philippe Stroppa : p. 3, 7, 9, 16, 22, 28, 32 - LNE : p. - 1, 8, 13, 17, 20, 25, 27, 33, 34 - LNE-SYRTE : p. 16, 40 - LNE-CNAM : p. 11, 12, 21, 38 - LNE-LNHB : p. 14, 15, 39 - LNE-CETIAT : p. 27, 41 - Adobe Stock : p. 4, 18, 30, 36 - IstockPhoto : 4, 24 - Polimi : 20 - DR

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

