



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

LABORATOIRE
NATIONAL
DE MÉTROLOGIE
ET D'ESSAIS



RAPPORT RECHERCHE
2025

PHOTO DE COUVERTURE :
DÉTAIL DU RÉFRIGÉRATEUR À DILUTION DE LA PLATEFORME METRIQS-FRANCE

EDITORIAL



« ÉTALONS DE MESURE,
SURVEILLANCE DE
L'ENVIRONNEMENT,
ÉVALUATION DE L'IA...
NOS LABORATOIRES SONT
SUR TOUS LES FRONTS »

THOMAS GRENON, DIRECTEUR GÉNÉRAL

L'année 2025 a été marquée par le 150^e anniversaire de la Convention du mètre, le traité aux fondements du Système international d'unités, le SI. Cet événement a été pour la communauté métrologique mondiale une formidable occasion de rappeler la contribution de la métrologie au développement de nos sociétés, et de mettre en avant son caractère indispensable pour relever les grands défis de notre temps.

Dans cette perspective, le LNE et ses partenaires du RNMF ont été aux avant-postes. Les 21 et 22 mai, lors de la conférence scientifique organisée par le BIPM, nos chercheuses et chercheurs ont présenté 17 posters, dont un a été sélectionné par les organisateurs pour représenter la thématique santé. Par ailleurs, du 19 au 23 mai, le LNE-LNHB a organisé à Paris le 24^e conférence internationale sur la métrologie des radionucléides et ses applications (ICRM 2025). Enfin, du 20 au 24 octobre derniers, le Cnam, le LNE et le Cetiati ont organisé à Reims la Conférence TEMPMEKO-ISHM 2025, sur les mesures de température, d'humidité et de propriétés thermiques des matériaux, réunissant près de 400 scientifiques du monde entier. Cette vivacité de la métrologie française a également été partagée avec le public tout au long de l'année, lors d'un cycle de onze conférences organisées par le LNE dans ses locaux parisiens.

Étalons de mesure, transition énergétique, surveillance de l'environnement, évaluation de l'intelligence artificielle... nos laboratoires sont sur tous les fronts. Deux faits marquants de l'année 2025 l'illustrent à merveille. La mise sur orbite à bord de la Station spatiale internationale de l'horloge PHARAO : pièce maîtresse de la mission ACES de l'ESA, cette horloge à atomes froids, conçue au LNE-OP, a pour objectif scientifique de tester la théorie de la relativité générale à des degrés de précision encore jamais atteints. En effet, PHARAO permet d'atteindre une incertitude record de 10^{-16} sur la mesure de fréquence. Grâce à cette performance unique, elle permettra par ailleurs la comparaison intercontinentale d'horloges optiques dans la perspective de la redéfinition de la seconde en 2030.

De même, à la croisée de la science fondamentale de haute volée et d'applications industrielles prometteuses, le LNE a inauguré sa plateforme de métrologie quantique MetriQs-France. Hébergée par plusieurs laboratoires du RNMF, cette instrumentation a pour vocation la caractérisation et l'évaluation des performances d'équipements et d'instruments de mesure à base de technologies quantiques. Mise à la disposition de l'ensemble de l'écosystème quantique, cette nouvelle plateforme s'affiche telle un équipement indispensable pour propulser la France dans le peloton de tête des nations qui maîtrisent ces technologies de rupture.

Pour conclure, j'ajouterai simplement un chiffre : 117 ; c'est le nombre de publications scientifiques des équipes R&D du LNE l'année passée. Chiffre record, il illustre le dynamisme de notre recherche qui, 150 ans après la signature de la Convention du mètre, est aussi plus que jamais celui de la métrologie !

SOMMAIRE

• Éditorial	3
• Carte d'identité du LNE et du Réseau national de la métrologie française (RNMF)	6
• 150 ^e anniversaire de la Convention du mètre : le LNE à la fête !	8
• DOSSIER : les nouveaux polluants de l'environnement dans le collimateur des métrologues	10
• Le LNE-CETIAT : trait d'union entre industrie et recherche	14
• Prix LNE de la Recherche 2025 : trois unités de base du SI à l'honneur	16
• Le LNE à la Fête... de la science !	18



COMPÉTITIVITÉ INDUSTRIELLE

• Mesures thermiques à l'échelle nanométrique: une incertitude record	20
• Neutrons épithermiques : un champ de référence en ligne de mire	20
• Technologies sans fil 5G et 6G : des méthodes de test pour convaincre	21
• Paramètres S : la métrologie HF valide, même à haute impédance	21
• Évaluer l'IA hybride pour élargir son adoption dans l'industrie	22
• L'évaluation de l'IA passe en mode défense	22
• Technologies quantiques : une plateforme de métrologie pour leur envol	23
• La France, pays hôte de TEMPMEKO-ISHM 2025	24
• Le LNE-LNHB organisateur de l'ICRM-2025	24



TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

• Naissance d'une métrologie de la qualité électrique des réseaux en courant continu	26
• Des matériaux de référence pour la mesure de l'acidité des océans	28
• Les gaz à effet de serre : mesurer les émissions d'origine agricole	28
• Refroidissement passif des bâtiments : vers une métrologie adaptée	29
• Mesures de luminance : les contrastes de lumière sous l'œil des métrologues	29
• Hydrogène : une métrologie pour son déploiement à grande échelle	30



SANTÉ ET SÉCURITÉ DES CITOYENS

- Analyses médicales : une méthode pour qualifier des étalons primaires 32
- Contamination chimique des emballages papier-carton : leur recyclage sécurisé 33
- Détection de matières illicites : les neutrons en renfort 34
- Impulsions d'électrons ultra-flash : leur traçabilité démontrée 34



MÉTROLOGIE FONDAMENTALE

- PHARAO dans l'espace : première horloge de référence pour éprouver Einstein 36
- De l'ytterbium pour une référence de fréquence optique "transportable" 38
- Un algorithme IA pour la détection de radionucléides *in situ* 39
- Un pont de résistance pour la thermométrie par sonde SThM 39
- T4K : une référence de température pour tester les technologies quantiques 40
- Kilogramme dématérialisé : le LNE au meilleur niveau européen 41

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES (HDR) OBTENUE EN 2025 41

THÈSES DE DOCTORAT SOUTENUES EN 2025 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 2025

25 %
du budget global du LNE

Plus de **130**
docteurs et ingénieurs

16
doctorants

117
publications dans des revues
à comité de lecture

Un portefeuille
de **15** brevets

LA RECHERCHE DU RNMF EN 2025

Plus de **290** scientifiques

124
projets de recherche

dont **64** JRP
(EURAMET *Joint Research Projects*)

193
publications dans des revues
à comité de lecture

+ de **300** communications
présentées lors de conférences

59
thèses de doctorat en préparation
dont **21** soutenues et **4** HDR obtenues

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

LNE & LNE-CNAM : LCM

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

LNE

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

LNE-LNHB

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

LNE-OP

Le laboratoire de métrologie LNE-OP, responsable des références nationales de temps, de fréquence et de gravimétrie, est situé au sein du LTE (Laboratoire Temps-Espace) l'Observatoire de Paris - PSL. *Le LNE-SYRTE est devenu LNE-OP au 1^{er} janvier 2025.*

LNE-CETIAT

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

LNE-ENSAM

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

LNE-TRAPIL

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

LNE-LADG

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

LNE-LTFB

Le Laboratoire Temps-Fréquence de Besançon, au sein de SupMicrotech-ENSMM et de l'Université Marie et Louis Pasteur (UMLP), 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-ASNR

Le laboratoire de métrologie et de dosimétrie des neutrons (LMDN) de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection, à Cadarache, est en charge des références nationales pour la dosimétrie des neutrons. *En 2025, l'IRSN et l'ASN ont fusionné pour devenir l'ASNR.*

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

En 2025, la communauté internationale de la métrologie a fêté le 150^e anniversaire du traité international aux fondements du Système international d'unités (SI). L'occasion pour le LNE d'organiser et de participer à plusieurs événements qui ont rappelé l'importance de la métrologie pour relever les défis d'aujourd'hui et de demain.

L'actualité donne à voir un monde qui se fragmente. Il est pourtant un domaine où le consensus demeure remarquablement solide : la métrologie. L'année 2025 en a offert une illustration forte avec les célébrations du 150^e anniversaire de la Convention du mètre, le traité international aux fondements de l'organisation internationale actuelle de la métrologie et du SI auquel la France a pris une part décisive dès l'origine.

À travers plusieurs manifestations, cet anniversaire a permis au LNE de rappeler combien la métrologie est indispensable à la quasi-totalité des activités humaines, et de montrer qu'elle constitue un levier essentiel pour relever les grands défis contemporains.

« *Au-delà des antagonismes entre les nations, la métrologie offre une vision commune qu'aucune vicissitude de l'Histoire n'est parvenue à entamer* », souligne Maguelonne Chambon, directrice de la recherche scientifique et technologique du LNE. Cette vision, enracinée dans l'idéal des Lumières, remonte à la Révolution française.

En 1791, l'Assemblée constituante prend la décision de définir « *une unité qui ne renferme ni d'arbitraire ni de particulier à la situation d'aucun peuple sur le globe.* » C'est le point de départ de l'épopée des deux astronomes Delambre et Méchain qui, pendant 7 ans, mesurent une fraction du méridien de Paris d'où ils déduiront la longueur du mètre, jetant les bases du système métrique, ancêtre du SI.

Dans le courant du XIX^e siècle, à la faveur de la révolution industrielle et de l'émergence d'un vaste marché international, les grandes nations prennent conscience de la nécessité de mettre en place un système de normes communes. D'un mot, il s'agit d'assurer qu'un kilogramme de sucre est le même à Paris, New York ou Londres. Par conséquent, le 20 mai 1875, à Paris, dix-sept pays signent la Convention du mètre, créant ainsi le Bureau international des poids et mesures (BIPM). En 2025, ce sont 64 États membres et 36 États et entités économiques associés qui prennent part aux activités internationales de métrologie. Dans un contexte de mondialisation des échanges, il s'agissait de mettre en place une infrastructure cohérente d'unités de mesure et d'organiser leur dissémination. « *Ça n'est pas juste un traité scientifique ou à vocation commerciale, insiste la directrice. La Convention du mètre a également une raison sociale, celle d'assurer l'équité et l'égalité de toutes et tous face aux mesures.* »

Ce caractère universel de la mesure a conduit l'UNESCO à faire du 20 mai la Journée mondiale de la métrologie. Aussi, c'est dans l'enceinte de cette organisation internationale, à Paris, qu'ont débuté les festivités du 150^e anniversaire lors d'un symposium regroupant des représentants des États, des instituts nationaux de métrologie, des organisations de liaison internationales, des scienti-



CYCLE DE CONFÉRENCES "LES MESURES ET..." ORGANISÉES AU LNE



tiques et d'autres professionnels de la métrologie. Dans ce cadre, Maguelonne Chambon a animé une table ronde où ont été discutées les futures opportunités de la métrologie mondiale dans le contexte de la Décennie internationale des sciences pour le développement durable de l'UNESCO, 2024-2033.

Car c'est sa force, la métrologie n'a de cesse d'évoluer. À la signature de la Convention du mètre, les unités fondamentales ne sont que trois : le mètre, le kilogramme et la seconde. Mais au gré du développement des sciences et techniques et des besoins de la société, le SI s'enrichit petit à petit d'unités supplémentaires : il compte aujourd'hui sept unités de base. Par ailleurs, en 150 ans, la définition des différentes unités de base a évolué. Ainsi, depuis 2018, toutes sont reliées à la valeur d'une constante de la nature.

À la fois fondée sur la science la plus fondamentale et les techniques de pointe, mais toujours en prise avec les questions pratiques de son temps, toutes ces facettes ont été mises en lumière les 21 et 22 mai derniers, lors de la conférence organisée par le BIPM au Palais des Congrès de Versailles pour fêter l'anniversaire de la Convention du mètre. « *Pour la communauté mondiale des métrologues, il s'agissait de mettre en avant un siècle et demi de progrès, de coopération internationale et d'innovation qui ont contribué au développement de nos sociétés, tout en offrant une vision pour l'avenir* », explique la directrice.

À cette occasion, un appel à soumission de posters sur les défis

clés de la métrologie avait été organisé. Plus de 385 posters ont été fournis. De leur côté, les laboratoires français ont répondu présents avec 17 posters sélectionnés, dont celui de Chiara Giangrande, chef de projet au LNE, « *Standardisation of Measurements of Neurodegenerative Disease Biomarkers: The NEuroBioStand Project* », mis en avant par les organisateurs pour représenter la thématique Santé de la conférence, et qui a fait l'objet d'une présentation orale.

Signe du caractère incontournable de la métrologie, le comité français de radioélectricité scientifique (URSI-France) a lui aussi fêté cet anniversaire lors de ses Journées scientifiques organisées du 10 au 12 juin 2025. Sous la présidence scientifique de Joseph Achkar du LNE-OP et la coprésidence de Djamel Allal du LNE, les conférences données portaient sur le thème « La métrologie au cœur des technologies contemporaines ».

Par ailleurs, le LNE a souhaité mettre la métrologie à l'honneur tout au long de l'année écoulée à travers un cycle de conférences ouvert à tous. Lancé le 16 janvier 2025 avec une première rencontre intitulée « Les mesures et leur histoire », ce cycle s'est poursuivi au cours de dix rendez-vous thématiques explorant divers aspects de la métrologie contemporaine et de ses applications. Animées par des experts et chercheurs, en collaboration avec les laboratoires du Réseau national de la métrologie française, elles se sont achevées le 11 décembre avec une conférence intitulée « Les mesures et le climat ». Au total, ces 11 sessions de conférences, avec 33 intervenants, ont réuni près de 400 participants et fait l'objet de 6 000 visionnages en direct ou en différé sur la chaîne YouTube du LNE, certaines conférences ayant été visionnées jusqu'à 1 500 fois. « *Technologies quantiques, IA, environnement, santé, énergie... nous souhaitons partager avec le public la façon dont la métrologie est omniprésente dans toutes les dimensions de nos vies*, explicite Maguelonne Chambon. *Ça a été un réel succès !* » Celui d'une discipline qui après 150 ans n'a pas pris une ride et continue d'œuvrer pour toujours plus d'unité !



150^e ANNIVERSAIRE : LE LNE DANS LES MÉDIAS !

À l'occasion du 150^e anniversaire de la Convention du mètre, le LNE a ouvert ses portes à la presse. Les 15, 16 et 19 mai 2025, trois journées de visite ont permis à 19 journalistes de découvrir les installations du laboratoire en compagnie de 8 experts maison. À la clé : 40 articles de presse qui ont contribué à vulgariser les activités du LNE et l'importance de la métrologie pour la quasi-totalité des activités humaines.

Par ailleurs, le laboratoire a noué un partenariat avec la chaîne YouTube Scilabus qui a expliqué à ses presque 600 000 abonnés le b.a.-ba de la métrologie. Enfin, le LNE a réalisé un ensemble de 5 « *Shorts* », ou films courts, qui, diffusés sur les réseaux sociaux, ont comptabilisé plusieurs dizaines de milliers de vues !

DOSSIER

LES NOUVEAUX POLLUANTS DE L'ENVIRONNEMENT DANS LE COLLIMATEUR DES MÉTROLOGUES

Face à la multiplication des polluants, la surveillance de l'environnement, en particulier de l'air et de l'eau, est un enjeu de plus en plus prégnant. Celle-ci nécessite le développement de protocoles de mesure adaptés à une réglementation en perpétuelle évolution.

Les interdictions de consommation de l'eau du robinet, contaminée par des « polluants éternels », dans plusieurs communes françaises, ont récemment frappé les esprits. Cette actualité illustre la montée en puissance des enjeux liés aux pollutions environnementales, qu'elles concernent l'eau ou l'air. Hormones, gaz à effet de serre, particules, microplastiques... au fil du temps, le nombre de substances faisant l'objet d'un suivi ou de révisions des seuils réglementaires ne cesse de croître.

Dans ce contexte, la métrologie chimique du LNE joue un rôle central : accompagnant ou anticipant l'évolution de la réglementation, elle est indispensable pour fiabiliser les mesures. Les travaux menés au laboratoire, et plus précisément les résultats obtenus courant 2025 en témoignent.

« Notre particularité est de proposer une expertise dans un très grand nombre de domaines », résume Paola Fisicaro, responsable du pôle « Métrologie chimique » du LNE, dont les équipes « Environnement et Changement climatique » et « Gaz et Aérosols » se partagent l'essentiel des développements en métrologie des polluants. Leur boussole ? Les directives européennes, dont la *directive-cadre sur l'eau* (la DCE) et la *directive sur la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe*, ainsi que leurs évolutions continues et leurs multiples déclinaisons nationales.



Par exemple, dès 2015, plusieurs hormones ont été ajoutées à la « Watch list » de la DCE qui recense les substances émergentes ou préoccupantes ; ce qui a conduit le LNE à développer des méthodes de mesure pour ces perturbateurs endocriniens dans l'eau, en particulier dans le cadre du projet européen EDC-WFD¹, coordonné par le laboratoire.

Finalisé en 2022, ce projet a établi des éléments de base pour la rédaction d'une norme internationale sur l'extraction et l'analyse d'œstrogènes, publiée en 2025. Forts de ce succès, les chercheuses et chercheurs du LNE continuent à mettre au point des méthodes de mesure pour les nouvelles substances à surveiller, tels les résidus médicamenteux, les

agents de protection solaire ou les produits phytosanitaires.

Les microplastiques suivis à la trace

Et en 2025, ce sont les microplastiques sur lesquels le laboratoire est parvenu à un aboutissement important avec la finalisation du projet EURAMET PlasticTrace visant à développer et à harmoniser des méthodes d'identification, de caractérisation et de quantification de ces nouveaux polluants. Depuis 2020, ceux-ci figurent en effet sur la liste de vigilance des polluants émergents de la directive européenne « Eau potable » pour l'application de laquelle une norme a été publiée en 2025, grâce aux travaux des métrologues. Comme l'indique Enrica Alasonati, chercheuse en métrologie

¹- *Metrology for monitoring endocrine disrupting compounds under the Water Framework Directive*

chimique, « *les besoins portaient à la fois sur les méthodes de mesure et sur les matériaux de référence* ».

Pour sa part, le LNE a développé des compétences sur la spectroscopie micro-Raman, une méthode de spectroscopie vibrationnelle qui permet d'identifier les microplastiques et de classer leur quantité selon leur taille. Le laboratoire a par ailleurs pris en charge le traitement statistique des données de la comparaison interlaboratoire menée pour évaluer les performances (répétabilité et reproductibilité) des méthodes de spectroscopie vibrationnelle mentionnées dans la norme. Pour ce faire, les laboratoires participants ont analysé plusieurs matériaux pour couvrir des problématiques différentes (grande variété de microplastiques, faibles concentrations...). Les résultats montrent une répétabilité entre 20 % et 45 % et une reproductibilité entre 50 % et 70 %. « *Dans un domaine en devenir, ce sont de bons résultats* », commente la métrologue qui ajoute : « *Les difficultés concernent principalement la quantification des faibles concentrations des particules de taille inférieure à quelques dizaines de micromètres.* »

Pour les particules encore plus petites, approchant le nanomètre, le LNE a développé une technique de fractionnement par couplage flux-force couplée à la diffusion de la lumière (FFF-MALS) qui permet de caractériser et de classer des nanoplastiques par taille. Cette technique a en outre été évaluée dans le cadre d'une comparaison interlaboratoire, pilotée par le LNE sous l'égide du VAMAS, qui incluait plusieurs méthodes de mesure. « *Le traitement statistique des résultats de cet exercice multi-technique est en cours* », précise Enrica Alasonati. « *Les résultats sont satisfaisants, notamment pour la détermination de la taille des particules. Cela dit, nous avons travaillé à partir de matériaux en suspension très bien stabilisés. Dans les prochaines années, les efforts devront aussi porter sur les méthodes d'extraction des plastiques de leur matrice d'origine, ce à quoi nous nous employons, y compris pour les aspects normatifs.* »

De leur côté, les métrologues de l'équipe Gaz et Aérosols inscrivent nombre de leurs travaux dans le cadre de la fusion,

en 2024, d'une directive européenne de 2004 sur des polluants spécifiques avec la directive générale de 2008 sur « la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe » dont la pleine application est prévue en 2027. « *Certains seuils ont été abaissés, de nouvelles substances sont à surveiller, tel l'ammoniac, et la mise en place de super sites pour la mutualisation des mesures est prévue* », décrit Tatiana Macé, cheffe de projet « Qualité de l'air » au LNE.

Particules ultrafines : l'étalonnage primaire en ligne de mire

Afin d'anticiper ces évolutions, les chercheuses et les chercheurs du LNE travaillent par exemple de longue date sur la mesure de l'ammoniac, un polluant atmosphérique d'origine agricole ou industrielle. Ainsi, dès 2019, ils ont mis au point un étalon fondé sur le principe de la perméation pour l'étalonnage des instruments de mesure dans la gamme des fractions molaires d'intérêt, de quelques nanomoles par mole. À la suite, cet étalon a été comparé à celui du METAS, l'*alter ego* suisse du LNE, et depuis 2022, il permet l'étalonnage des analyseurs des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA).

De façon similaire, le LNE développe depuis 2025 un banc pour l'étalonnage des compteurs à noyaux de condensation (CNC) utilisés par les AASQA pour la mesure des particules ultrafines (PUF), dont la taille est inférieure à 100 nm. Principalement issues du trafic routier et de divers systèmes de combustion, les PUF représentent une masse négligeable parmi les particules fines mais sont une fraction importante du nombre total de particules. « *À l'issue de ce développement, nous ambitionnons de nous positionner comme laboratoire de référence pour ces étalonnages en lien avec deux normes que le LNE a contribué à rédiger* », explique Nicolas Hertel, responsable du département Gaz et Aérosols. « *Deux campagnes de mesure sont également programmées avec nos partenaires européens pour 2026.* »

Cette expertise sur les nanoparticules, le LNE l'applique également pour le suivi du carbone suie. Particules entre 10 nm et 500 nm, essentiellement composées de carbone graphitique et issues de la combustion incomplète de matières carbonées, elles sont aussi désormais considérées comme « polluant émergent ».



DOSSIER

Ainsi, depuis 2020, le laboratoire a la capacité de générer de telles particules, et de mesurer leur masse par des méthodes photométriques. Comme l'indique Nicolas Hertel, « fort de ce savoir-faire, nous sommes actuellement engagés dans le projet EURAMET StanBC dont l'enjeu est d'établir une norme pour l'étalonnage des analyseurs spécifiques à ce polluant ».

La dilution isotopique pour fiabiliser les mesures

Une autre expertise du LNE porte sur les PFAS, une large famille de composés présentant des liaisons carbone-fluor et caractérisés par une grande persistance dans l'environnement, qui font l'objet d'une attention réglementaire de plus en plus soutenue. S'agissant des émissions industrielles, la révision de 2023 de la directive européenne sur les émissions industrielles sera applicable en 2028 et étendra ainsi l'obligation de surveillance à de nombreux composés PFAS. Dans ce contexte, le LNE participe depuis 2024 au projet EURAMET MetZeroPol pour améliorer les méthodes de quantification des PFAS.

Ce processus d'amélioration continue des méthodes de mesure et des savoir-faire du laboratoire de métrologie chimique s'illustre par les travaux conduits dans le cadre du projet d'EURAMET MetroPOEM finalisé en octobre 2025 et ciblé sur les mesures isotopiques. Précisément,



les métrologues se sont concentrés sur des mesures de rapport isotopique du lithium (${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$) par spectroscopie de masse. Ils ont participé à une comparaison organisée par leurs collègues allemands de la PTB.

Comme l'explique Johanna Noireaux, cheffe de projet transverse « Environnement » au LNE, « cet exercice nous a permis de valider les corrections de biais instrumental de mesure de masse par des mesures sur des matériaux de référence déjà existants ou développés dans le cadre du projet ».

À la clé, une fiabilisation des mesures réalisées au LNE par la mise en œuvre d'une méthode reposant sur la dilution isotopique. Celle-ci permet de déterminer la quantité d'un élément présent à l'état de trace dans un échantillon par ajout d'une quantité connue d'un étalon du même élément mais avec un rapport isotopique différent. « De cette façon, nous caractérisons et certifions notamment les fractions massiques de cadmium, nickel et plomb contenues dans des filtres qui permettent aux AASQA d'assurer un contrôle de la performance de leurs méthodes de mesure des métaux utilisées en routine », explique la métrologue.

Façon de garantir la fiabilité des mesures de pollution de l'air que nous respirons, tout comme le LNE assure celle des mesures de polluants dans l'eau que nous buvons !

LE LNE PILIER D'AQUAREF ET DU LCSQA

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) a été créé en 1991 en appui du ministère chargé de l'environnement par trois laboratoires experts du domaine : l'Ineris, le LNE et l'IMT Nord Europe. Au sein du LCSQA, le LNE, qui en assure la présidence, est le garant de la qualité des mesures effectuées par les Associations Agréées de Surveillance de la qualité de l'Air (AASQA).

Né en 2007, le consortium AQUAREF est le laboratoire de référence pour assister les autorités publiques et les opérateurs pour la définition et la mise en œuvre des programmes de surveillance des milieux aquatiques. Regroupant le BRGM, l'Ifremer, l'INERIS, l'INRAE et le LNE, AQUAREF a pour objectif de proposer des méthodes, des outils et des référentiels techniques pour garantir la qualité des données et anticiper les besoins futurs de surveillance.

Par exemple, des membres d'AQUAREF, dont le LNE, participent aux campagnes de surveillance et rédigent des fiches méthodologiques qui sont mises à disposition des laboratoires de mesure sur le site internet d'AQUAREF. Ces fiches, complétées par d'autres données de validation, leur permettent de garantir la fiabilité des méthodes de mesure utilisées.

« NOTRE PARTICULARITÉ EST DE PROPOSER UNE EXPERTISE DANS UN TRÈS GRAND NOMBRE DE MESURES CHIMIQUES »



LE LNE-CETIAT : TRAIT D'UNION ENTRE INDUSTRIE ET RECHERCHE

Laboratoire du RNMF, le LNE-CETIAT est chargé des références nationales pour l'hygrométrie, la débitmétrie des liquides eau et l'anémométrie. Ses missions nationales de métrologie s'organisent au sein de trois équipes.

Le CETIAT, Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques, a fêté en 2025 ses 65 ans. Situé à Villeurbanne, le centre a été créé pour accompagner les industriels du chauffage, de la ventilation et de la climatisation, en matière d'essais et de R&D. Comme l'indique Éric Georgin, directeur des Études et de la Formation, « Qui dit essais, dit mesures. Aussi, le CETIAT a-t-il dès le début développé une expertise en métrologie ». Et c'est ainsi que le laboratoire LNE-CETIAT s'est vu confier la responsabilité des références nationales, d'abord pour l'hygrométrie puis la débitmétrie des liquides en eau et l'anémométrie, dans le cadre des activités du Réseau national de la métrologie française (RNMF). Dans ces trois domaines de métrologie, il met en place et améliore les étalons primaires, les bancs d'étalonnage et contribue aux activités de normalisation, tout en menant des recherches et développements pour accompagner les innovations industrielles.

Hygrométrie : des gaz aux solides, une infrastructure en constante évolution

En hygrométrie, le LNE-CETIAT est en charge de la référence nationale depuis 1980 et a acquis une reconnaissance internationale en participant à une comparaison interlaboratoire dans les années 1990. Aujourd'hui les références sont constituées de trois générateurs d'air humide fonctionnant entre -80 °C et +10 °C pour le premier et entre -60 °C et +90 °C pour les deux autres.



MESURE DE RÉFÉRENCE DE MICRODÉBITS, AU LNE-CETIAT

« Au sein d'une boucle fermée, de l'air circule entre un saturateur, où il se charge en vapeur d'eau jusqu'à saturation, et les hygromètres à étalonner. La température du saturateur est alors la température de rosée, ou de gelée, de référence de l'air humide distribué aux hygromètres ; et avec des conditions de température maîtrisées, une humidité relative de référence peut être définie », explique Éric Georgin.

Par ailleurs, le laboratoire dispose depuis 2023 d'un générateur à dilution dans lequel la référence d'humidité du gaz distribué repose sur le débit massique d'eau évaporée injecté dans un flux de gaz sec dont le débit est précisément mesuré. Ce dispositif permet de mesurer l'humidité dans des gaz à une pression entre 0,2 bar et 10 bar, contre 0,8 bar à 2 bar avec les autres

générateurs, et ceci pour tout type de gaz, y compris dans la gamme des très faibles humidités étudiée dans le cadre du projet EURAMET PROMETH20. Ses installations d'hygrométrie évoluent en permanence. Ainsi, dans le cadre du projet EURAMET HIT de 2014, le laboratoire avait développé des capacités d'étalonnage jusqu'à 140 °C. Le LNE-CETIAT a désormais des moyens d'étalonnage en mode dynamique, représentatifs d'environnements où la variation d'humidité peut être rapide.

Ces dernières années, il s'est engagé dans les projets EURAMET METefnet, BiofMET et GrainMET, lui permettant de développer une référence primaire pour la mesure d'humidité dans les solides, pour étalonner des humidimètres, capteurs de contrôle des zones de stockage de matériaux de construction,

de biomasse, de médicaments ou de denrées agricoles. Et en 2024, le laboratoire a mis au point un nouvel instrument de mesure de référence fondé sur la variation de la fréquence de résonance d'une cavité cylindrique pour mesurer, sur site, la teneur en eau d'échantillons solides.

Débitmétrie : une large expertise, du procédé industriel courant à la microfluidique

Le LNE-CETIAT est aussi en charge des références nationales pour la mesure de débit liquide en eau. Le principe de mesure de référence est simple : placer le débitmètre à étalonner dans un écoulement d'eau bien établi et, une fois le régime stabilisé, l'eau est dirigée vers une cuve de pesée où le débit liquide est déduit de la masse d'eau recueillie pendant un intervalle de temps donné. « *La traçabilité au SI de la mesure du débit est donc assurée par le raccordement des mesures de masse et de temps aux étalons nationaux respectifs* », précise Kevin Romieu, référent technique du laboratoire.

Précisément, le LNE-CETIAT a développé plusieurs bancs de référence. Destiné aux macrodébits, le banc historique, exploité depuis les années 1980 et référence nationale depuis 2001, permet les étalonnages entre 5 kg/h et 50 t/h (5 L/h et 50 m³/h). Cette gamme de débits couvre la plupart des besoins industriels en matière de refroidissement, procédés chimiques, traitement des eaux...

À partir de 2008, le laboratoire a étendu ses capacités de mesure vers les milli- et microdébits en développant un banc de référence pour les débits entre 1 g/h et 100 kg/h (1 mL/h à 100 L/h). Il repose sur un générateur pressurisé capable de délivrer des débits stables pour une pression de ligne comprise entre 0,1 bar et 10 bar relatif, mesurés avec une incertitude de 0,1 %, à une température située entre 10 °C et 50 °C, capacités de mesure assez rares parmi les laboratoires nationaux de métrologie.

Plus récemment, le LNE-CETIAT s'est doté d'un banc spécifique aux nanodébits, jusqu'à 60 nL/h (environ 1 goutte par mois). Pour ces débits extrêmement faibles, la mesure repose sur l'utilisation d'un capillaire, dont la section a été étalonnée, et sur la mesure du déplacement du ménisque de liquide. Ce dernier est déterminé à l'aide d'une caméra, dont les paramètres d'acquisition des images sont étalonnés (fréquence d'enregistrement et taille du pixel), et d'un algorithme développé lors d'une thèse de doctorat soutenue en 2022. Les mesures sont réalisables en mode dynamique avec des incertitudes comprises entre 12 % et 0,15 % pour les débits de 10 à 1500 nL/min, plaçant le LNE-CETIAT parmi les quelques laboratoires au monde à avoir ces performances.

Dans le secteur de la microfluidique, en expansion, le laboratoire a contribué à la rédaction de deux normes ISO dans le cadre du projet EURAMET MFMET. Et avec le projet actuel MFMET-II qui lui fait suite, des protocoles de mesure adaptés aux fluides complexes seront définis. En complément, les métrologues améliorent leurs étalons de transfert destinés aux étalonnages sur site. Enfin, pour les grands débits, le laboratoire est aussi accrédité par le Cofrac depuis 2021 pour l'étalonnage dynamique à 1 kHz de débitmètres entre 5 kg/h et 12 000 kg/h.



Anémométrie : une compétence originale au service direct de l'industrie

L'anémométrie est le troisième domaine de responsabilité nationale du LNE-CETIAT. Concrètement, il a mis au point un anémomètre de référence pour mesurer la vitesse de l'air, qui repose sur un laser et l'effet Doppler. Les mesures sont effectuées dans deux souffleries dans lesquelles la vitesse de l'air et le régime d'écoulement sont parfaitement maîtrisés. La première soufflerie, conçue dans les années 1980, permet d'obtenir une vitesse d'air entre 0,15 m/s et 40 m/s, en écoulement horizontal et à une température régulée entre 10 °C et 40 °C. La seconde, développée à la fin des années 1990, délivre une vitesse d'air entre 0,05 m/s et 2 m/s pour des écoulements horizontaux ou verticaux. Elle fonctionne entre 10 °C et 50 °C et à un taux d'humidité relative allant de 10 % à 90 %. Ces moyens performants et uniques en France sont devenus les références nationales d'anémométrie en 2001.

En 2010, un dispositif de mesure à disque tournant a complété les moyens de référence. Celui-ci est destiné à l'étalonnage des anémomètres Doppler Laser. Comme le mentionne Éric Georgin, « *ces installations sont très performantes et répondent parfaitement aux besoins actuels de l'industrie* ».

Rayonnement international : une implication active au sein d'EURAMET

En charge de missions nationales au sein du RNMF pour trois domaines de métrologie, les équipes du LNE-CETIAT sont très engagées dans les activités internationales de métrologie, en premier lieu au sein de la communauté européenne. Ainsi Éric Georgin est le représentant français dans le sous-groupe Humidité du comité technique Température d'EURAMET et du groupe *Humidity* du comité de thermométrie (CCT) du CIPM. Et, Isabelle Caré est la représentante française dans le comité technique Débit (*TC-Flow*) d'EURAMET, qu'elle a d'ailleurs présidé de 2019 à 2023, et dans son sous-groupe Vitesse de fluide. À ce titre, elle a co-organisé une École d'été d'EURAMET en 2024 sur la débitmétrie, qui a rassemblé 56 étudiants. De son côté, Kevin Romieu est animateur du sous-groupe Débit liquide du comité technique *TC-Flow*.

Signe que, 65 ans après sa création, le CETIAT n'a pas pris une ride et le LNE-CETIAT joue pleinement son rôle au sein du RNMF.

PRIX LNE DE LA RECHERCHE 2025 :

TROIS UNITÉS DE BASE DU SI À L'HONNEUR

Le prix LNE de la Recherche a été décerné en 2025 à Matthieu Thomas, responsable du département Électricité fondamentale du LNE, et à Jean-Pierre Wallerand, responsable de l'équipe Longueur-Lasers au LNE-CNAM. Olga Kozlova, chercheuse dans l'équipe Thermométrie du LNE, est par ailleurs lauréate du Prix Jeune Chercheur du LNE. Dans les domaines de métrologie respectivement de la masse, la longueur et la température, tous trois ont des contributions remarquables dans la réalisation et la dissémination d'unités fondamentales du SI.

Jean-Pierre Wallerand, vous êtes spécialiste des lasers, sur quoi ont porté vos premiers travaux ?

Jean-Pierre Wallerand : Dès ma thèse de doctorat, soutenue en 1997, puis à l'issue de mon recrutement au Cnam, en 1999, j'ai travaillé au développement de solutions pour la réalisation du mètre. Au début de ma carrière, j'ai réalisé des sources lasers asservies sur des transitions moléculaires. Puis à partir de 2005, j'ai eu la responsabilité de développer un peigne de fréquences issu d'un laser femtoseconde qui, aujourd'hui encore, permet de comparer les références de longueur d'onde du LNE-CNAM à un étalon de fréquence.



JEAN-PIERRE WALLERAND

Matthieu Thomas, vous avez toujours travaillé sur la balance de Kibble ?

Matthieu Thomas : En effet, je suis arrivé au LNE en 2011 pour la préparation de mon doctorat. À l'époque, le projet Balance de Kibble, initié dans la perspective de la redéfinition du kilogramme, actée en 2018, débutait. À l'issue de ma soutenance, en 2015, j'ai été recruté par le LNE. Depuis, je travaille à améliorer la balance pour réaliser l'unité de masse indépendamment de la valeur consensuelle internationale. C'est amusant car, enfant, j'étais fasciné à l'idée qu'il existait quelque part un kilogramme étalon conservé sous trois cloches de verre !

Olga Kozlova, vous êtes spécialiste des lasers et de physique atomique, sur quoi avez-vous d'abord travaillé ?

Olga Kozlova : J'ai soutenu mon doctorat en 2012 au LNE-OP (alors LNE-SYRTE) en métrologie du temps-fréquence. Puis j'ai été recrutée au LNE dans l'équipe de pyrométrie optique où, dans le cadre de différents projets européens, j'ai d'abord travaillé sur la dissémination du kelvin à partir de sa définition de 2019. J'ai contribué au développement d'un spectroradiomètre à base d'un filtre acousto-optique et à la mise au point d'un thermomètre



MATTHIEU THOMAS

à élargissement Doppler. En parallèle, j'ai aussi contribué aux mesures par voie optique de la température thermodynamique des points fixes de température au-delà de 1 000 K.

Jean-Pierre Wallerand, par la suite, vous vous êtes intéressé à la mesure de grandes distances ?

Jean-Pierre Wallerand : Oui, j'ai pris part à différents projets européens en lien avec la mesure de distances de plusieurs kilomètres. Avec mes collègues Joffray Guillory et Daniel Truong, nous avons développé un télémètre laser à deux longueurs d'onde qui permet de s'affranchir de la mesure de l'indice de l'air. En parallèle, avec le même type de télémètre, nous avons contribué à la mise au point d'une méthode de positionnement dans l'espace de pièces industrielles ou de robots à 10 μm près.

Matthieu Thomas, précisément, quelles ont été vos contributions au développement de la balance de Kibble ?

Matthieu Thomas : À la suite de mon recrutement, j'ai participé aux mesures de la constante de Planck (h), un préalable à une nouvelle définition du kilogramme du SI. Le LNE a ainsi fait partie des trois laboratoires au monde à avoir fourni, à l'aide d'une balance de Kibble, une valeur de h pour calculer la valeur retenue dans la définition de 2018. Ensuite, j'ai été nommé responsable du projet « Réalisation du kilogramme ». Dans ce cadre, avec mes collègues Djamel Ziane et Patrick Espel, j'ai amélioré l'infrastructure, approfondi son bilan d'incertitude et apporté de nombreuses modifications qui ont permis *in fine* de réduire le bruit de mesure d'un facteur 4 par rapport à 2017.

Olga Kozlova, vous travaillez depuis 2018 sur un nouveau type de thermomètre ?

Olga Kozlova : En effet, dans le cadre d'une collaboration, initiée par mon collègue Stéphan Briaudeau, entre le LNE-CNAM, le LKB et le C2N, j'ai participé au développement d'un nouveau type de thermomètre fondé sur un nano-résonateur opto-mécanique qui permet de mesurer la température en détectant optiquement les mouvements mécaniques du résonateur. Cette collaboration a permis d'ajouter une nouvelle technique de mesure de la température thermodynamique au laboratoire, pour couvrir la gamme étendue entre 4 K et 300 K.



OLGA KOZLOVA



Jean-Pierre Wallerand, plus récemment vous vous êtes intéressé aux mesures de pression ?

Jean-Pierre Wallerand : Oui, je suis impliqué dans le développement d'étalons de pression fondés sur la mesure par interférométrie de la densité du gaz. Ces étalons sont amenés à jouer un rôle important, notamment dans la gamme des basses pressions, en complément des étalons mécaniques.

Matthieu Thomas, quels sont les derniers développements concernant la balance de Kibble ?

Matthieu Thomas : En 2024, j'ai conduit des mesures dans le cadre de la comparaison internationale visant à établir la valeur internationale consensuelle du kilogramme. Affichant une incertitude de $3,7 \times 10^{-8}$, ces mesures placent le LNE parmi les meilleures réalisations au niveau mondial, le rapprochant de la cible de 2×10^{-8} qui permettra de réaliser le kilogramme indépendamment de la valeur consensuelle internationale. J'ai par ailleurs lancé en 2020 un projet de balance à force électrostatique pour mesurer une masse de l'ordre de 1 mg et une force de l'ordre de 10 μ N.

Olga Kozlova, l'une de ces méthodes de mesure est fondée sur un effet purement quantique ?

Olga Kozlova : Dans le cadre du projet européen PhoQuS-T, nous développons en effet une technique de mesure absolue fondée sur la mesure du bruit quantique de la pression de radiation



du laser sonde pour calibrer le bruit thermique du résonateur. L'acquisition récente d'un cryostat sans hélium liquide, financé par le DIM QuantIP d'Ile de France, nous permettra de poursuivre ces expériences directement au LNE-CNAM et de mener la caractérisation métrologique de ces dispositifs prometteurs pour la thermométrie.

Que représente pour vous le prix ?

Jean-Pierre Wallerand : Cela met en valeur l'activité et les qualités scientifiques et techniques d'une équipe. Même sans demandes directes, nous cherchons en permanence à aller dans des directions qui auront un impact dans le secteur industriel. Le prix, c'est la reconnaissance que nos orientations et nos thématiques de recherche depuis plusieurs années étaient les bonnes.

Matthieu Thomas : Lors de l'annonce, j'ai été un peu gêné d'être le seul récompensé. Depuis plus de 10 ans, nous sommes en fait quatre chercheurs à être impliqués dans les développements de la balance de Kibble, tous visant l'excellence pour la réalisation et dissémination du kilogramme. Ce prix est donc en fait une façon de mettre en valeur ce travail collectif.

Olga Kozlova : Je ne suis pas très à l'aise d'être ainsi mise en avant, mais le prix me fait très plaisir. Au-delà, c'est la reconnaissance d'un travail d'équipe dans un environnement favorable pour que les recherches progressent depuis les concepts fondamentaux jusqu'aux expériences très pratiques. C'est ma motivation !

LE LNE À LA FÊTE... DE LA SCIENCE !

À l'occasion de la Fête de la science, le LNE a ouvert ses portes au public. Le 7 octobre, des classes de lycéens et d'étudiants ont été accueillies sur le site du laboratoire à Trappes. Guidés par plusieurs collaborateurs, ces jeunes se sont familiarisés avec l'univers de la mesure au travers de quatre ateliers animés par les spécialistes du LNE.

Au programme : un TP d'étalonnage d'un luxmètre (pour la mesure de l'éclairage lumineux), une démonstration dans le « hall d'électricité à très haute tension », et les visites du laboratoire radio et de la plateforme d'évaluation de l'intelligence artificielle LE.IA Immersion.

Quelques jours plus tard, dans le cadre d'une journée portes ouvertes, le grand public a été accueilli dans les locaux du LNE à Paris. À cette occasion, il a pu prendre part à différents ateliers, se joindre à des visites de laboratoires et assister à des démonstrations. Changement climatique, pollution, acidification des océans... Cette année, le laboratoire avait particulièrement mis à l'honneur les mesures de l'impact de l'Homme sur l'environnement.



Car comme le résume Maguelonne Chambon, directrice de la recherche scientifique et technologique du LNE, « pour agir efficacement, il faut d'abord mesurer correctement ! »

Les visiteurs ont également pu se familiariser avec les concepts de mesure et d'incertitude, appliqués à des domaines variés allant des nanomatériaux, à la radioactivité en passant par les analyses médicales ou l'observation des cadastres énergétiques. Sans oublier le Système international d'unités, sans lequel il serait impossible d'acheter un



kilogramme de pommes, de mesurer le temps ou d'estimer sa consommation d'eau. De quoi prendre conscience de l'omniprésence de la métrologie dans toutes nos activités quotidiennes !

JOFFRAY GUILLORY, LAURÉAT DU GKGM-AWARD EN 2025

Joffray Guillory de l'équipe Longueur du LNE-CNAM a reçu le prix GKGM-award, décerné par le GKGM, société savante des pays européens germanophones sur les instruments de mesure géodésique, à l'occasion de la conférence JISDM qui s'est tenue à Karlsruhe (Allemagne) en avril 2025.

Ce prix récompense sa contribution majeure en géodésie par la mise au point d'un télémètre à deux longueurs d'onde permettant d'assurer la traçabilité au SI des mesures de distance de plusieurs kilomètres. Il fait suite aux deux prix décernés en 2023 et 2024 au chercheur et ses collègues, Daniel Truong et Jean-Pierre Wallerand, par le journal *Measurement Science and Technology*. Ces distinctions témoignent du dynamisme et de la qualité des recherches menées ainsi que de la reconnaissance internationale du travail de l'équipe.

LYDIA CHIBANE, PRIX DU POSTER AU NANOSCIENTIFIC FORUM EUROPE 2025

Lydia Chibane a remporté le prix du meilleur poster du forum européen NSF-Europe 2025, organisé les 17-19 septembre au Laboratoire de Physique du Solide (Université Paris-Saclay, Orsay).

Elle y présentait les travaux sur la métrologie corrélative appliquée au suivi de la réduction de l'oxyde de graphène. Sous la direction d'Emmanuel Flahaut du CIRIMAT de Toulouse et d'Alexandra Delvallée du LNE, ces travaux ont été menés dans le cadre d'une collaboration entre trois équipes du LNE : nanométrie dimensionnelle et électrique, et métrologie des propriétés thermiques des matériaux.

COMPÉTITIVITÉ INDUSTRIELLE

La métrologie constitue un levier essentiel de l'innovation et de la compétitivité industrielle. En intervenant sur des domaines clés tels que les nouvelles technologies de détection, les nanotechnologies, la nanoélectronique de communication, les technologies quantiques et l'intelligence artificielle, le LNE et le RNMF apportent aux industriels les références de mesure et des outils de qualification nécessaires à la fiabilisation et au déploiement de ces technologies émergentes.



MESURES THERMIQUES À L'ÉCHELLE NANOMÉTRIQUE : UNE INCERTITUDE RECORD

L'emploi de matériaux nanostructurés par l'industrie des semi-conducteurs implique de connaître leurs propriétés thermiques, à l'échelle de quelques dizaines de nanomètres. Pour les mesurer, le LNE dispose d'un microscope thermique à sonde locale (S_{Th}M) et, dans le cadre d'un projet de recherche finalisé en 2025 et d'une thèse de doctorat soutenue également en 2025, les métrologues thermiciens ont poursuivi l'amélioration de la traçabilité de leur instrumentation.

Au début du projet, le LNE était l'un des deux laboratoires de métrologie européens à proposer des mesures de conductivité thermique au-dessous de $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pour encore faire mieux, les métrologues ont travaillé sur plusieurs fronts. Le protocole d'étalonnage a ainsi été amélioré en

recourant à un nouvel échantillon de référence dont la conductivité thermique est comprise dans la gamme étudiée, et en appliquant une méthode d'identification bayésienne pour déterminer la courbe d'étalonnage de leur microscope. Par ailleurs, le protocole de mesure en mode « *dark mode* » a été affiné. Comme l'explique Sarah Douri, nouvelle experte S_{Th}M de l'équipe, « *en travaillant sans le laser utilisé pour contrôler la position de la sonde, nous avons réduit les perturbations d'origine thermique* ».

À la clé, une incertitude de mesure réduite de moitié, désormais autour de 10 %, soit la plus faible en Europe. De quoi répondre aux nouvelles sollicitations d'industriels en matière de caractérisation thermique de nanomatériaux aux très petites échelles.



NEUTRONS ÉPITHERMIQUES : UN CHAMP DE RÉFÉRENCE EN LIGNE DE MIRE

Le LNE-ASNR étalonne des instruments de mesure utilisés en radioprotection en les plaçant dans des champs de neutrons maîtrisés. Dans ce cadre, le laboratoire a finalisé en 2025 un projet de métrologie pour étendre les capacités de génération de champs de sa plateforme CARAT, déployée actuellement autour d'un accélérateur T400. Ce dernier, bientôt remplacé par le GN400, pourra générer un nouveau champ de référence épithermique, d'énergie de 0,5 eV à 10 keV.

Cette gamme intermédiaire de neutrons est exploitée dans l'industrie nucléaire,

en radiothérapie avec la technique BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*), ou encore pour mesurer l'humidité des sols et y suivre les effets du réchauffement climatique.

Dans le cadre d'une thèse de doctorat, menée en collaboration avec le CNRS/LPSC à Grenoble, les métrologues ont modélisé un modérateur adapté à leur besoin à l'aide d'un algorithme d'optimisation topologique développé au LPSC. « *Ce travail, en phase finale, vise à concevoir un modérateur modulaire capable de délivrer des champs de différentes fluences* », précise Amokrane

Allaoua, responsable du projet au LNE-ASNR.

En parallèle, un autre modérateur, plus simple et de petite taille, a été développé pour l'accélérateur AMANDE. Il permettra de mettre au point les détecteurs de référence nécessaires à la caractérisation du nouveau champ de référence de CARAT. Cela fera du LNE-ASNR le premier laboratoire au monde à disposer d'une installation d'étalonnage d'instruments de mesure dans la gamme d'énergie des neutrons épithermiques.

TECHNOLOGIES SANS FIL 5G ET 6G : DES MÉTHODES DE TEST POUR CONVAINCRE

Les technologies électroniques RF émergentes se caractérisent par un accroissement de leur complexité matérielle et logicielle. Et leur essor dépend en partie de la mise en place de méthodes de caractérisation qui soient traçables au SI, pratiques et compatibles avec les contraintes industrielles. C'était l'objectif du projet prénormatif d'EURAMET MEWS, finalisé en 2025 et coordonné par le LNE.

Dans le premier volet, les 18 partenaires ont étudié des tests OTA (*over the air*), pour réaliser des mesures sans connectique, par exemple pour vérifier l'efficacité de transmission d'antennes multifaisceaux.

Un autre aspect du projet concernait la caractérisation du canal de propagation de signaux complexes à large bande passante jusqu'à 750 GHz, relative à la façon dont un signal RF est modifié lors de sa propagation en environnement réel.

Enfin, les métrologues européens ont développé des méthodes de mesure traçables pour évaluer l'exposition aux radiofréquences (DAS) des systèmes 5G. De leur côté, les chercheurs du LNE ont dressé le bilan d'incertitude associé à un système de mesure distant, rapide et facile à mettre en œuvre.

Comme l'indique Djamel Allal, coordinateur de MEWS, « à l'issue du projet, sept livrables, tels des guides de bonnes pratiques, sont désormais en accès libre et ont été transmis aux comités de normalisation ». Déjà une contribution a été reprise dans un rapport technique de l'IEC/IEEE pour évaluer la densité de puissance absorbée entre 6 GHz et 300 GHz.

PARAMÈTRES S : LA MÉTROLOGIE HF VALIDE, MÊME À HAUTE IMPÉDANCE

De nombreuses applications émergentes des technologies de communication à distance et d'électronique : 5G, internet des objets, véhicules autonomes... reposent sur des composants de dimension nanométrique pour traiter des signaux à large bande de fréquences, de quelques dizaines de gigahertz jusqu'au térahertz. D'où un besoin des industriels du secteur de renforcer la traçabilité des mesures électriques dans ce domaine.

Parmi elles, la mesure des paramètres S, relatifs au comportement d'un dispositif vis-à-vis des signaux à son entrée, dépend de l'impédance du composant testé. Or, à très petite échelle ou à haute fréquence, celle-ci peut être très loin de l'impédance de référence (50Ω) prise pour étalonner les analyseurs de réseaux vectoriels (VNA) utilisés pour mesurer les paramètres S.

Ainsi, dans le cadre d'un projet de la Métrologie française et de la thèse de doctorat associée, le LNE a conçu un jeu d'étalons de haute impédance (quelques kilo-ohms) sous la forme de nano-circuits avec des structures jusqu'à 500 nm. « Fabriqués et caractérisés géométriquement par l'IEMN, partenaire du projet, ces dispositifs ont ensuite



MESURE DE PARAMÈTRES S SOUS POINTES, AU LNE

été évalués métrologiquement au LNE », détaille Djamel Allal, responsable du projet.

À la suite, le laboratoire d'électricité HF a développé les méthodes d'étalonnage d'un VNA à partir de ces étalons, pour la mesure de paramètres S sous pointes. La thèse soutenue, en décembre 2025, la nouvelle méthode de mesure est désormais prête à l'emploi.

ÉVALUER L'IA HYBRIDE POUR ÉLARGIR SON ADOPTION DANS L'INDUSTRIE

L'intégration de l'intelligence artificielle dans l'industrie ouvre des perspectives en matière de productivité et d'innovation, en particulier l'IA dite hybride qui tire parti de la complémentarité entre l'IA fondée sur des techniques d'apprentissage et celle fondée sur des règles Expert. Dans ce cadre, le projet européen ULTIMATE, coordonné par *Thales Research & Technology* et finalisé en 2025, avait l'ambition de mettre en place un cadre méthodologique de tests pour encourager le recours à ces technologies.

L'un des objectifs était de créer des méthodes d'évaluation fiables afin d'apprécier la précision, la robustesse et la sécurité des solutions proposées. À cette fin, les chercheurs en évaluation IA du LNE ont développé des bases de données pour tester des algorithmes de robotique dans un environnement virtuel. Un premier cas consistait à qualifier le robot en termes de productivité et de sécurité en contexte de collaboration avec un humain. Un autre pour tester un robot devant accomplir, seul, une tâche d'identification et de tri de différents objets.

Comme l'explique Daniel Caon, responsable du projet au LNE, « à partir de vidéos d'une situation réelle, nous avons créé



un jumeau numérique qui permet de faire varier différents paramètres tels que l'intensité, la direction ou la couleur de l'éclairage, ou encore l'apparence, les gestes, les mouvements et les attitudes de l'opérateur humain ». De quoi *in fine* évaluer et améliorer les performances des IA hybrides dans un environnement industriel réel.

L'ÉVALUATION DE L'IA PASSE EN MODE DÉFENSE

Les intelligences artificielles spécialisées dans le traitement automatique du langage sont en plein essor, faisant de leur déploiement dans le secteur de la Défense un enjeu majeur de souveraineté. Langues rares, application sur le terrain, environnement bruité... le sujet est par nature complexe, mais la fiabilité est néanmoins une nécessité. Dans ce contexte, le LNE s'est engagé depuis 2025, pour une période de cinq années, dans le projet ARCHER financé par le Fonds européen de la Défense dans le but d'évaluer différents systèmes d'IA langagière à finalité de Défense.

Concrètement, l'évaluation s'appuiera sur un challenge auquel participent trois consortiums européens. Décliné en plusieurs phases, il verra s'affronter différents systèmes dans l'exécution de tâches de transcription à partir d'un enregistrement audio, de reconnaissance de texte sur une image, de traduction, et d'identification de thèmes ou de situations dans un contenu.



De son côté, le LNE contribue à la définition des paramètres d'évaluation et à l'analyse des résultats. « Pour ce faire, nous avons défini des indicateurs intégrés qui permettent de résumer en quelques chiffres les performances des différents algorithmes pour des tâches complexes », détaille Olivier Galibert, responsable du projet au LNE.

Après un premier *round* « à blanc » en 2025 pour valider le processus, la première phase d'évaluation débutera dans le courant 2026. Elle s'appuiera sur un « oracle » développé par le LNE, un protocole pour explorer divers aspects de l'interaction entre l'humain et la machine.

TECHNOLOGIES QUANTIQUES : UNE PLATEFORME DE MÉTROLOGIE POUR LEUR ENVOL

La Stratégie nationale sur les technologies quantiques (SNQ) a pour ambition de mettre sur pied l'écosystème capable de propulser la France dans le peloton de tête des nations maîtrisant ces technologies. Le 11 décembre 2025, en présence de Loïc Le Loarer, coordinateur de la SNQ au Secrétariat général pour l'investissement, et de Domitille Legrand, directrice de projets Économie de la donnée à la Direction générale des entreprises, Thomas Grenon a inauguré la plateforme de métrologie quantique MetriQs-France. Elle est un élément structurant de la mise en œuvre du programme MetriQs-France, coordonné par le LNE et destiné à l'évaluation et à la normalisation des technologies quantiques.

Impliquant trois laboratoires du Réseau national de métrologie française (RNMF), la plateforme réunit des équipements à l'état de l'art pour mettre en œuvre des mesures fiables, objectives et comparables des caractéristiques et des performances de ces technologies de rupture. En particulier, le financement apporté par la SNQ a permis l'acquisition de nouveaux équipements, renforçant les capacités de mesure sur des thématiques prioritaires telles que le calcul quantique, les capteurs quantiques et les technologies habilitantes qui sont nécessaires à la mise en œuvre des dispositifs quantiques.

Précisément, cette plateforme est déployée autour de quatre pôles : caractérisation des qubits à l'état solide et des technologies habilitantes, notamment l'électronique RF et la cryogénie, au LNE ; développement de la thermométrie de référence aux plus basses températures, au LNE-CNAM ; caractérisation des gravimètres quantiques et caractérisation des horloges atomiques de dernière génération, au LNE-OP.



SIGNATURE DE L'ACCORD NMI-Q LE 15 OCTOBRE 2025 AU LNE



PLATEFORME METRIQS-FRANCE AU LNE, POUR LA CARACTÉRISATION DES QUBITS ET DES TECHNOLOGIES HABILITANTES

Ouverte à l'ensemble des acteurs de l'écosystème quantique – académiques, industriels et startups – la plateforme ambitionne de devenir une référence à l'échelle nationale et internationale, tout en s'inscrivant dans une démarche de coopération internationale avec les laboratoires nationaux de métrologie les plus avancés, comme la PTB en Allemagne, l'INRiM en Italie, le NPL au Royaume-Uni, le NIST aux États-Unis ou le NMIJ au Japon. Ces collaborations se développent notamment dans le cadre de l'initiative NMI-Q signée au LNE le 15 octobre 2025.

Ainsi, la plateforme contribuera à l'élaboration et à la valorisation de référentiels de mesure et d'évaluation des technologies quantiques. Ces référentiels sont développés dans le cadre de projets de R&D financés par le programme MetriQs-France, comme le projet MOCQUA. Débuté en octobre 2025, il vise à développer des méthodes de mesure de référence pour une caractérisation fiable et objective des composants matériels et des sous-systèmes nécessaires à la fabrication à grande échelle de calculateurs quantiques à l'état solide.

Les études portent sur les calculateurs fondés sur des qubits supraconducteurs ou sur des qubits de spin dans les semi-conducteurs, cela autour de trois axes : optimisation du fonctionnement de ces calculateurs, sécurisation de la chaîne d'approvisionnement des composants, positionnement commercial des fournisseurs français, et adoption des technologies quantiques émergentes par le marché.

La plateforme MetriQs-France sera également exploitée dans des projets européens tels que Qu-Test qui vise la mise en place d'une infrastructure européenne, ouverte, de test et de mesure des technologies quantiques.

LA FRANCE, PAYS HÔTE DE TEMPMEKO-ISHM 2025

Du 20 au 24 octobre, à Reims, la France a accueilli pour la première fois le congrès TEMPMEKO (15th Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science), rendez-vous phare de la métrologie thermique mondiale.

Organisé par le Cnam avec le soutien du LNE et du Cetiati, sous l'égide d'IMEKO et avec le soutien de la Société Française de Thermique, et couplé cette année à la conférence ISHM sur l'humidité, l'événement a réuni près de 400 participants venus de 39 pays pour échanger autour de 158 conférences et 157 exposés affichés. Les métrologues du RNMF ont pour leur part contribué avec 39 présentations orales et affiches. Deux ont été récompensées par un prix remis à Lara Risegari et Catherine Martin du LNE-CNAM pour l'un, et Mandeep Singh du LNE pour l'autre, pour le développement de points fixes de température, respectivement à moyenne et à basse température.



LE LNE-LNHB ORGANISATEUR DE L'ICRM-2025



Du 19 au 23 mai 2025, le LNE-LNHB a organisé à Paris la 24^e Conférence internationale sur la métrologie des radionucléides et ses applications (ICRM-2025). L'événement a réuni 226 participants venus de 33 pays, autour de 40 présentations orales, dont 10 assurées par des chercheurs du LNE-LNHB. Ablaihan Utepov, post-doctorant au LNE-LNHB, a par ailleurs reçu l'un des deux prix du meilleur poster pour ses travaux sur le thème « *Reference-free measurement of X-ray emission intensities in the decay of standard radionuclides* ».

La conférence a également été l'occasion du renouvellement du bureau directeur du Comité international sur la métrologie des radionucléides (ICRM), avec l'élection de Mark Kellett (LNE-LNHB) à l'un des postes de vice-présidents.

TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

La transition écologique et énergétique s'appuie sur des données de mesure comparables. Par leurs travaux sur la qualité de l'énergie électrique, le suivi des milieux naturels, l'isolation thermique ou la chaîne d'alimentation en hydrogène, le LNE et le RNMF contribuent à éclairer les choix technologiques et normatifs au service d'un développement durable.

PROJET PHARE

NAISSANCE D'UNE MÉTROLOGIE DE LA QUALITÉ ÉLECTRIQUE DES RÉSEAUX EN COURANT CONTINU

Développer une chaîne de mesure pour caractériser les perturbations électriques existant sur les réseaux à courant continu (DC), et ce jusqu'à 500 kHz, a été au cœur du partenariat avec EDF, dont la finalité était de maîtriser la distribution de l'énergie DC et d'en sécuriser ses usages.

L'essor de l'énergie électrique issue de sources renouvelables, ses nouveaux usages comme les transports ainsi que son stockage nécessitent des réseaux électriques spécifiques en courant continu (DC). Le déploiement de ces nouvelles infrastructures requiert des outils métrologiques et des normes spécifiques afin d'en garantir leur fiabilité et l'usage en toute sécurité. Dans ce contexte, le LNE mène des travaux depuis quelques années pour étudier la qualité de l'énergie sur ces réseaux DC, comme ce fut le cas avec son projet DC-500 finalisé en 2025.

Pour cela, le partenariat régulier établi avec EDF s'est concrétisé par le financement d'une thèse de doctorat, soutenue tout début 2026, qui a été co-encadrée par le laboratoire GeePs de CentraleSupélec et le laboratoire de métrologie basse fréquence du LNE. Les travaux avaient l'objectif de définir des protocoles et des dispositifs de mesure de l'énergie distribuée par les réseaux DC. Ils ont abouti au développement d'une chaîne complète d'étude des perturbations présentes sur le réseau, comme les distorsions des signaux jusqu'aux fréquences de 500 kHz.

Au terme de leur projet, les métrologues ont montré que ces perturbations provenaient de deux sources principales : les convertisseurs électriques de puissance qui transforment le courant entre le réseau alternatif (50 Hz) et le réseau DC, et la charge due aux dispositifs connectés sur le réseau. Or comme l'explique Daniela Istrate ingénieure de recherche au LNE et co-encadrante de la thèse, « *même avec une intensité de 1 % à 10 % de la composante continue, ces signaux perturbateurs, avec une large bande de fréquence, ont des conséquences importantes, comme des perturbations électromagnétiques* ».

Afin de les étudier en détail, les chercheurs ont pu disposer de données réelles fournies par EDF et issues d'une plateforme expérimentale en courant DC. Dans un premier temps, ils ont appliqué les méthodes d'analyse définies dans les normes en vigueur, donc pour le courant alternatif. Mais, comme le décrit la chercheuse, « *toutes ces méthodes reposent sur l'existence d'une fréquence fondamentale à 50 Hz, qui n'existe pas dans le cas des réseaux DC* ».



🗨️ Trois questions à...

DANIELA ISTRATE, INGÉNIEURE DE RECHERCHE AU LNE

Comment est née votre collaboration avec EDF ?

D.I. : C'est une collaboration au long cours qui a débuté en 2018 avec le projet EURAMET prénormatif SupraEMI sur la mesure des émissions harmoniques sur réseau à courant alternatif. Puis s'ensuit en 2021, cette fois dans le contexte des réseaux DC, le projet prénormatif DC-grids qui a consolidé les échanges entre les métrologues du LNE et les ingénieurs d'EDF, jusqu'à cette thèse de doctorat qui sera soutenue en février 2026.

Concrètement qu'apporte cette collaboration aux partenaires ?

D.I. : D'un côté, le LNE apporte sa compétence en métrologie pour les mesures, l'analyse des résultats et les étalonnages. De l'autre, EDF apporte sa vision industrielle qui a influencé la manière d'aborder les problématiques. Sans oublier le concours du laboratoire GeePs qui, par sa supervision rigoureuse, a été crucial pour l'analyse et la présentation des résultats durant toute la thèse.

Quelles sont les suites envisagées de ces travaux ?

D.I. : Les développements approfondis effectués durant la thèse sont une première étape vers l'établissement d'une norme pour la mesure et l'analyse des perturbations électriques sur les réseaux DC. Afin de les compléter par des mesures sur site, nous élaborons actuellement un projet EURAMET prénormatif qui sera aussi l'occasion de mener une comparaison interlaboratoire pour établir des limites d'émissions électromagnétiques à ne pas dépasser en courant continu.

PROJET PHARE



Autrement dit, il leur a fallu repenser totalement la chaîne d'analyse et mettre au point une méthode d'analyse fréquentielle, spécifique aux signaux continus perturbés. Ainsi les métrologues ont sélectionné plusieurs paramètres de traitement des données, tel le type de « fenêtre » à utiliser pour réduire les erreurs liées à la mesure sur une durée finie, pour permettre une détermination fiable des amplitudes des différentes composantes spectrales. Comme le souligne Daniela Istrate, « la méthode développée a été optimisée pour analyser les perturbations de fréquence inférieure à 9 kHz. Au-delà, la méthode utilisée en courant alternatif a pu être adaptée aux signaux étudiés ».

Afin d'évaluer les performances de leur algorithme d'analyse, les scientifiques l'ont appliqué à un signal de référence généré numériquement contenant des perturbations typiques de celles observées sur un réseau DC. Par ailleurs, ils ont développé deux systèmes de mesure adaptés aux réseaux DC : un système de laboratoire et un autre adapté aux mesures sur site. À la suite, ces deux systèmes ont été testés et caractérisés avec un véritable signal électrique de courant continu de référence, pouvant atteindre 350 V pour la composante continue seule et 400 V maximum avec des perturbations.

 EN CHIFFRES

Le système mis au point permet de mesurer des tensions jusqu'à 1 000 V et des intensités jusqu'à 100 A, sur des signaux de courant continu présentant des distorsions pouvant aller jusqu'à 500 kHz.

Les incertitudes de mesure varient entre 5×10^{-4} pour la tension DC et 6×10^{-3} pour la tension à la fréquence de 500 kHz.

« IL A FALLU METTRE AU POINT UNE MÉTHODE D'ANALYSE FRÉQUENTIELLE SPÉCIFIQUE AUX SIGNAUX DC PERTURBÉS »

Comme le précise Daniela Istrate, « le système de mesure d'EDF, développé à l'aide de cartes électroniques 24 bits, a une très bonne résolution mais sa fréquence d'échantillonnage est limitée à 1 MHz. Celui du LNE, avec un système d'acquisition à 18 bits, permet donc des mesures avec un pas de quantification plus grand mais avec une fréquence d'échantillonnage allant jusqu'à 5 MHz ».

Résultat : Dans les deux cas, en prenant en compte l'ensemble des éléments de la chaîne de mesure, capteurs, méthode d'acquisition et algorithme de traitement, l'incertitude relative sur les mesures de tension n'est que de 7×10^{-4} pour les fréquences jusqu'à 150 kHz, et se situe autour de 6×10^{-3} jusqu'à 500 kHz ; dans tous les cas, plus faible que l'incertitude typique obtenue pour les mesures des fréquences harmoniques réalisées en courant alternatif. Ces résultats ont été transmis aux différents groupes de normalisation de la Commission électrotechnique internationale, et ont déjà fait l'objet du « Technical Report 63282 » qui intègre les résultats d'analyse obtenus dans le cadre de ce partenariat de recherche. C'est la première étape pour établir les normes qui garantiront la qualité de l'électricité distribuée sur les réseaux DC, structures essentielles sur le chemin de la décarbonation de nos économies.

DES MATÉRIAUX DE RÉFÉRENCE POUR LA MESURE DE L'ACIDITÉ DES OCÉANS

Le pH est un des paramètres clés pour le suivi de l'acidification des océans. Toutefois, sa définition, dépendante de la matrice de la solution, en fait une grandeur complexe du point de vue métrologique. Dans le cadre du projet EURAMET SapHTies coordonné par le LNE et d'une thèse de doctorat, tous deux finalisés en 2025, l'équipe de métrologie chimique a ainsi développé des matériaux de référence pour assurer la traçabilité au SI des mesures d'acidité des eaux marines.

Pour la mesure du pH_T (pH total) pratiquée par les océanographes, les métrologues ont mis au point des solutions tampons d'eau de mer artificielle qu'ils ont caractérisées par la méthode primaire électrochimique des cellules de Harned.

De plus, ils ont proposé des matrices artificielles comme matériaux de référence pour évaluer l'alcalinité totale, un autre des quatre paramètres clés retenus pour le suivi de l'acidification des océans. « Ces matériaux sont utilisés pour les mesures par titration potentiométrique et nous avons déterminé leur valeur de référence par gravimétrie et coulométrie », indique Gaëlle Capitaine, chercheuse au LNE. Si les propriétés des matériaux de référence pour l'alcalinité totale doivent encore être optimisées, les références de mesure du pH_T sont, elles, désormais qualifiées, incertitudes comprises, pour l'étalonnage des spectrophotomètres utilisés en océanographie. Les métrologues ont en outre participé à l'amélioration de la norme ISO sur la mesure du pH_T par spectrophotométrie.



LES GAZ À EFFET DE SERRE : MESURER LES ÉMISSIONS D'ORIGINE AGRICOLE

Au niveau mondial, l'agriculture représente environ 20 % du total des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique. Afin d'atteindre l'objectif européen de neutralité carbone à l'horizon 2050, ce secteur constitue donc un levier prioritaire de réduction des émissions. Dans ce contexte, le LNE a contribué au projet EURAMET QuantiAGREMI, qui avait pour but de développer une infrastructure de mesure des émissions d'origine agricole.

Outre son rôle de coordinateur, le laboratoire a organisé et mené dans ses murs une comparaison interlaboratoire

de quatre références primaires de génération d'ammoniac, dont celle du LNE. L'équipe de métrologie chimique développe depuis plusieurs années un tel étalon qui repose sur la perméation en phase gazeuse. « Nous avons réalisé l'ensemble des mesures avec un système spectroscopique mis au point par la PTB », explique Paola Fiscaro, responsable du projet au LNE. « Et nous avons évalué à 3,4 % l'incertitude de génération d'ammoniac de l'étalon et à 0,8 % sa reproductibilité. »

En parallèle, les ingénieurs en science des données du LNE ont décliné la méthode générique d'évaluation des

incertitudes de mesure aux émissions d'installations agricoles. Un premier bilan complet d'évaluation d'incertitude associé à un modèle d'émissions a pu être établi.

L'ensemble du projet européen a ainsi permis de définir des indicateurs pour estimer des émissions *in situ*. Par ailleurs, trois nouveaux types de capteur de mesure d'ammoniac ont été mis au point, dont un a abouti à un dépôt de brevet par l'IMT Nord Europe.

REFROIDISSEMENT PASSIF DES BÂTIMENTS : VERS UNE MÉTROLOGIE ADAPTÉE

Les matériaux dits « *passive cooling* », avec une forte émissivité thermique surtout aux longueurs d'onde de 8 μm à 13 μm , ont un haut potentiel pour le refroidissement de bâtiments sans recours à des dispositifs électromécaniques. Leur essor industriel nécessite néanmoins un cadre métrologique adapté pour évaluer leurs performances énergétiques. C'était l'enjeu du projet EURAMET PaRaMetriC, finalisé en 2025 et auquel le LNE a participé.

Partant d'un état de l'art balbutiant, les métrologues ont ainsi réalisé une série

de mesures sur des échantillons de ces matériaux, sous forme de peintures ou de films minces. Précisément, les techniques de spectrophotométrie ont été améliorées pour mesurer plus justement l'absorption solaire de ces matériaux ainsi que leur émissivité spectrale dans la partie infrarouge du rayonnement. Par ailleurs, grâce à un moyen calorimétrique unique en Europe, les chercheurs du LNE ont mesuré l'émissivité totale hémisphérique, caractéristique de l'émission thermique totale à une température donnée. « *Ce projet a été l'occasion pour nous de fiabiliser*

l'installation calorimétrique et ainsi d'atteindre une incertitude relative de mesure de 2 % contre 3,5 % auparavant », précise Jacques Hameury, spécialiste des mesures de propriétés thermiques au LNE.

En outre, le projet a permis de définir des protocoles de mesure afin d'accroître leur reproductibilité et la comparabilité des résultats. L'ensemble de ces développements sera par la suite mis à profit dans le cadre d'un groupe de normalisation en création.

MESURES DE LUMINANCE : LES CONTRASTES DE LUMIÈRE SOUS L'ŒIL DES MÉTROLOGUES

Caractériser les nuisances lumineuses est un enjeu de santé publique, de sécurité et de confort, tant en intérieur qu'en extérieur. Pour y répondre, il faut pouvoir mesurer la luminance, grandeur relative à la perception de la lumière par l'œil humain, y compris dans des situations d'éclairage complexes présentant notamment de forts contrastes lumineux, typiques d'un éblouissement. C'était l'objectif du projet EURAMET HiDyn, finalisé en 2025, auquel a participé le LNE-CNAM.

Ces mesures sont réalisées à l'aide de luminancemètres imageurs intégrant des méthodes dites HDR (*High Dynamic Range*). Celles-ci consistent à fusionner plusieurs images prises à des expositions variables afin de mesurer correctement les zones

sombres comme les zones très brillantes des scènes considérées. Si la traçabilité métrologique est bien établie pour des mesures ponctuelles, elle reste un défi pour des mesures à large champ. Dans ce contexte, les chercheurs en photométrie du LNE-CNAM ont développé un jumeau numérique permettant, à partir de scènes virtuelles, d'étudier la manière dont elles sont rendues en fonction du type d'imageurs et d'algorithmes de fusion utilisés. En particulier, « *nous avons montré que les aspects matériels l'emportent sur les différences entre algorithmes pour l'évaluation des erreurs* », mentionne Lou Gevaux, responsable du projet au LNE-CNAM.

L'ensemble des résultats de HiDyn ont permis de nourrir un guide de bonnes pratiques à destination des utilisateurs.

Pour le laboratoire français, ce projet a également été l'occasion de développer ses capacités de mesure et d'étalonnage des capteurs imageurs, actuellement en plein essor.



IMAGE EN FAUSSES COULEURS
DE LUMINANCE HDR, JRP HIDYN

HYDROGÈNE : UNE MÉTROLOGIE POUR SON DÉPLOIEMENT À GRANDE ÉCHELLE

Vecteur énergétique polyvalent, l'hydrogène a un rôle clé dans les stratégies de décarbonation de l'industrie, des transports ou encore du gaz de ville. Son déploiement à grande échelle suppose toutefois la mise en place d'une métrologie fiable et harmonisée tout au long de la chaîne d'approvisionnement, afin d'en garantir la qualité, la sécurité et la traçabilité. C'était l'enjeu du projet EURAMET Met4H2 auquel ont participé trois équipes du RNMF, illustrant l'étendue de l'expertise française sur ce domaine émergent

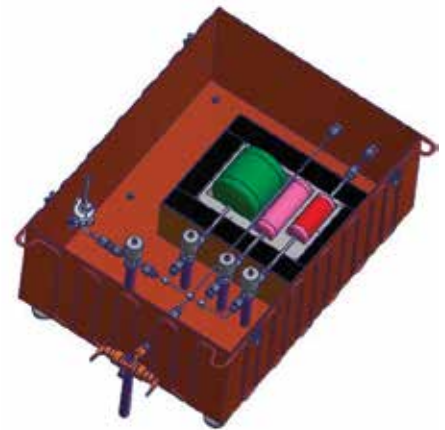
Les spécialistes de débitmétrie gaz du LNE-LADG ont évalué l'aptitude des compteurs de gaz de ville à mesurer des débits de mélanges gaz naturel/hydrogène ou d'hydrogène pur. Pour ce faire, ils ont modifié leur banc de débitmétrie primaire afin d'y adjoindre différents types de compteur domestique : débitmètre massique thermique, compteur à diaphragme et débitmètre à ultrasons. Comme l'explique Rémy Maury, responsable du LNE-LADG, « nous avons montré que la réponse des compteurs dépendait du mélange considéré, ce qui donne des pistes pour choisir la technologie de débitmètre la plus adaptée ».

Par ailleurs, les métrologues ont participé à une comparaison interlaboratoire d'étalonnages de différents compteurs étalons (turbine

et piston rotatif), tels ceux placés en tête des réseaux urbains, avec du gaz de ville et un mélange contenant jusqu'à 25% d'hydrogène. « Nous avons observé un bon accord des mesures confortant nos incertitudes pour ces types de compteur », poursuit le chercheur. Enfin, un guide de bonnes pratiques a été édité portant sur l'étalonnage des différents débitmètres disposés sur le réseau de distribution.

En parallèle, Frédéric Boineau, Jean-Pierre Wallerand et Zaccaria Silvestri, du LCM LNE-Cnam, ont participé au volet sécurité des installations d'hydrogène du projet, en proposant deux types de fluxmètre gazeux pour la mesure de fuites.

Le premier fluxmètre développé est dit « à volume constant » : le débit d'injection du gaz est évalué par une mesure de variation de pression dans un volume étalon. « Les deux principales difficultés ont été de contrôler la température de notre dispositif, et de pouvoir effectuer les mesures sur la gamme étendue de débits $[0,01 - 10] \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, ce qui a nécessité la mise en œuvre de plusieurs volumes étalons dans un environnement à inertie thermique élevée », explique Frédéric Boineau, spécialiste des très faibles pressions au LNE. Par la suite, une comparaison a montré une bonne cohérence des mesures entre les laboratoires participants. L'objectif est maintenant



**SCHEMA D'UN FLUXMÈTRE GAZEUX DU LNE
POUR DÉTECTION DE FUITES**

pour le LNE, d'élargir officiellement ses capacités d'étalonnage de fuites aux mesures à pression atmosphérique, en obtenant une accréditation Cofrac, limitée jusqu'à présent aux étalonnages sous vide.

Le deuxième fluxmètre, fondé sur la réfractométrie Fabry-Perot, a été proposé par les chercheurs du LNE-CNAM, Jean-Pierre Wallerand et Zaccaria Silvestri. Son principe : mesurer la fréquence de battement d'un laser dans une cavité, dont les variations sont liées à la variation d'indice du gaz contenu dans la cavité, grandeur elle-même reliée à la variation de sa densité molaire, donc au débit entrant dans la cavité. Pour l'étude de faisabilité, la comparaison interlaboratoire a mis en évidence des écarts d'environ 20 %. Pour autant, « ce dispositif de mesure présente l'intérêt d'accéder aux très faibles débits, $[10^{-4} - 0,01] \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, complémentaire donc du premier fluxmètre développé », commentent les scientifiques.

Ces trois contributions françaises font du RNMF un partenaire incontournable de l'essor de l'hydrogène.

« LE BANC DE DÉBITMÉTRIE PRIMAIRE A ÉTÉ MODIFIÉ POUR Y ADJOINDRE DIFFÉRENTS TYPES DE COMPTEURS DE GAZ »

SANTÉ ET SÉCURITÉ DES CITOYENS

Des mesures précises et comparables sont essentielles pour garantir la santé et de la sécurité des citoyens. Les références du LNE et du RNMF pour fiabiliser les examens médicaux, les faisceaux de radiothérapie ou la détection de substances illicites l'illustrent dans tous les compartiments de nos vies.

ANALYSES MÉDICALES : UNE MÉTHODE POUR QUALIFIER DES ÉTALONS PRIMAIRES

Le manque de traçabilité au SI des mesures réalisées pour les examens de biologie médicale conduit à des résultats difficilement interprétables et comparables entre eux. Dans ce contexte, le département « Bioanalyses » du LNE a finalisé en 2025 un projet de recherche pour caractériser des étalons primaires.

Ces étalons prennent la forme de composés hautement purifiés (glucose, cholestérol ou protéine) dont la pureté a été déterminée avec des outils métrologiques afin d'associer à cette valeur de référence la plus faible incertitude de mesure possible. Pour ce faire, le laboratoire a développé une méthode fondée sur la spectrométrie de masse qui, comme le précise Vincent Delatour, responsable du projet, « permet de détecter, identifier et quantifier simultanément un grand nombre d'impuretés distinctes ».

Cette méthode générique a été appliquée avec succès dans le cadre de divers projets de recherche européens. Et les étalons primaires ainsi caractérisés au LNE ont été exploités pour qualifier des méthodes de référence utilisées pour analyser des biomarqueurs de maladies neuro-dégénératives, cardio-vasculaires et du sepsis dans des échantillons biologiques.

Afin de renforcer ses compétences et ses capacités de mesure, le LNE a récemment acquis un nouveau spectromètre de masse, de très haute résolution, qui permettra d'analyser et discriminer des biomolécules complexes, existant sous des formes variables avec chacune une pertinence clinique propre.



ANALYSE PAR SPECTROSCOPIE DE MASSE DE LA PURETÉ D'ÉTALONS BIOLOGIQUES

CONTAMINATION CHIMIQUE DES EMBALLAGES PAPIER-CARTON : LEUR RECYCLAGE SÉCURISÉ

Les emballages en papier et carton constituent une alternative aux emballages alimentaires jetables en plastique. Leur utilisation au contact alimentaire n'est toutefois pas exempte de risques de contamination chimique. Le LNE a contribué au projet ANR FoodSafeBioPack, finalisé en 2025, qui visait à caractériser cette contamination, à comprendre les mécanismes de transfert des substances et à évaluer l'intérêt de solutions barrières biosourcées.

L'équipe de chimie des matériaux du LNE a étudié 132 emballages papier-carton représentatifs du marché français, principalement destinés au contact d'aliments secs et à un stockage à température ambiante, en ciblant 50 substances connues ou réglementées. Huiles minérales, phtalates et résidus d'encres d'impression... divers polluants ont été détectés dans les matériaux et les aliments à l'aide de techniques chromatographiques.



« Les emballages à base de fibres recyclées présentent des niveaux de contamination comparables à ceux des matériaux vierges, mais une diversité plus élevée de substances », explique Phuong-Mai Nguyen, ingénieure de recherche au LNE.

Les études menées sur des matériaux modèles ont permis d'élucider les mécanismes physico-chimiques de transfert, dominés par la diffusion dans le réseau fibreux et de montrer l'efficacité de barrières fonctionnelles à base de cellulose microfibrillée pour ralentir la migration de certains contaminants.

Ces travaux soulignent l'intérêt d'approches combinant choix de conception des emballages et attention portée aux étapes amont des filières de recyclage.

RENOUVELLEMENT POUR 5 ANS DU RMT PROPACK FOOD

Coordonné par le LNE et le CTCPA, le Réseau Mixte Technologique (RMT) ProPack Food, centré sur les emballages durables, l'économie circulaire et le gaspillage alimentaire, a été renouvelé pour 2026-2030 par le Ministère de l'agriculture, de l'agro-alimentaire et de la souveraineté alimentaire.

Dans un contexte de fortes évolutions réglementaires et sociétales, les 16 partenaires travailleront selon quatre axes de recherche : risque chimique, optimisation des emballages et conservation des aliments, nouveaux itinéraires technologiques, et dissémination des résultats.

Ce réseau de partenaires s'attachera ainsi à répondre aux besoins de l'industrie agro-alimentaire en termes de R&D et de diffusion des connaissances.



« 50 POLLUANTS ONT ÉTÉ
RECHERCHÉS PAR ANALYSE
CHROMATOGRAPHIQUE
DANS 132 EMBALLAGES
PAPIER-CARTON »

DÉTECTION DE MATIÈRES ILLICITES : LES NEUTRONS EN RENFORT

Explosifs, matières radioactives, stupéfiants... la lutte contre le trafic illicite de matières dangereuses nécessite des moyens de contrôle sur site, souples et efficaces. Dans ce contexte, les chercheurs du LNE-LNHB ont proposé une nouvelle méthode non-destructive pour détecter des agents à risque NRBC-E (nucléaire, radiologique, biologique, chimique, explosif). Fondée sur la détection de photo-neutrons, elle a fait l'objet en 2025 d'une preuve de concept prometteuse grâce à un projet de la Métrologie française.

Afin de contourner les limites de détection par rayons X, peu pénétrants, une méthode par mesure des photons gamma, issus de l'interaction entre des neutrons et les matériaux à détecter, avait alors été proposée. Cependant, le signal utile restait difficile à extraire du bruit de fond gamma. Alors, comme l'explique Valentin Blideanu, chercheur au LNE-LNHB, « nous avons pris le problème à l'envers et avons proposé de recourir à un faisceau de photons gamma pour irradier le produit suspect et de détecter les neutrons qu'il émet ». Le spectre des neutrons est en effet

une véritable signature des éléments à leur origine.

Ainsi, les métrologues ont démontré, en première mondiale, la faisabilité de leur approche en détectant les neutrons émis par les atomes d'azote présents dans un échantillon de mélamine, représentatif d'un matériau explosif, sous l'effet de son irradiation par des photons. Deux brevets ont été déposés, ouvrant la voie à un partenariat industriel et à une commercialisation de la méthode.

IMPULSIONS D'ÉLECTRONS ULTRA-FLASH : LEUR TRAÇABILITÉ DÉMONTRÉE

Les méthodes d'accélération par laser permettent de produire des impulsions d'électrons d'environ 100 MeV et d'une durée de quelques femtosecondes, potentiellement exploitables en radiothérapie pour délivrer des doses très élevées sur un temps très court.

Dans le cadre de son projet de recherche TRUFE, le LNE-LNHB a mis en place en 2025 les outils métrologiques pour établir la traçabilité, jusqu'alors inexistante, des mesures de dose sur ces impulsions dites « ultra flash ».

Précisément, les métrologues ont raccordé la dose absorbée des faisceaux femtosecondes de l'installation d'IRAMIS du CEA, à la référence primaire de débit de dose dans l'eau existante au LNE-LNHB/MD.

« La difficulté résidait dans l'impossibilité d'utiliser un détecteur calorimétrique primaire, trop peu sensible pour mesurer les impulsions ultra flash », explique Jean-Marc Bordy, chercheur en dosimétrie. « Nous avons donc dû étalonner un dosimètre chimique de transfert, développé au CEA, par rapport à la référence primaire d'un faisceau pulsé d'électrons de 18 MeV du LNE-LNHB. »

« IMPULSIONS
POTENTIELLEMENT
EXPLOITABLES EN
RADIOTHÉRAPIE »

Les différences en termes d'énergie et de durée d'impulsion entre les deux faisceaux ont conduit le laboratoire à introduire et évaluer des facteurs de correction au moyen de mesures et de calculs Monte-Carlo.

La méthode proposée aboutit à des incertitudes de mesure comprises entre 5 % et 10 %, qui devraient même être inférieures à 5 % après optimisation du détecteur chimique. Ainsi établi, le schéma de traçabilité pourra aussi être mis à profit pour des applications de radioprotection.



DOSIMÈTRE DE TRANSFERT
DANS UN FAISCEAU D'ÉLECTRONS FLASH,
AU LNE-LNHB

MÉTROLOGIE FONDAMENTALE

Les applications techniques de notre quotidien sont fondées sur une recherche en métrologie fondamentale de pointe. Le LNE et ses partenaires du RNMF y ont contribué par la conception de l'horloge atomique PHARAO mise sur orbite en 2025, le développement d'horloges optiques transportables pour la géodésie ou de dispositifs de mesure thermique ultrasensibles. Ces travaux sont indispensables pour améliorer la réalisation et la dissémination des unités SI de mesure.



PROJET PHARE

PHARAO DANS L'ESPACE : PREMIÈRE HORLOGE DE RÉFÉRENCE POUR ÉPROUVER EINSTEIN

Désormais en orbite à bord de l'ISS, l'horloge à atomes froids de césium PHARAO, développée par le LNE-OP et le CNES, a pour mission de tester la relativité générale et contribuera au processus de redéfinition de la seconde du SI.

Depuis le 21 avril 2025, l'horloge PHARAO est arrimée à l'extérieur du module européen Columbus de la Station spatiale internationale (ISS). Pièce maîtresse de la mission ACES (*Atomic Clock Ensemble in Space*) de l'Agence spatiale européenne (ESA), cette horloge à atomes froids de césium, définie puis validée par le LNE-OP et fabriquée sous la maîtrise d'œuvre du Centre national d'études spatiales (CNES), est ainsi la première référence primaire de fréquence autonome placée en orbite autour de la Terre. Placée en environnement de microgravité, au cours d'une mission de trois ans, elle devrait atteindre l'incertitude record de 10^{-16} pour une horloge fonctionnant à une fréquence micro-onde. Imaginée pour mettre à l'épreuve la théorie de la relativité générale d'Einstein, PHARAO est avant tout une prouesse métrologique qui réaffirme le savoir-faire exceptionnel des métrologues français du temps-fréquence.

Au début des années 1990, au moment même où le LNE-OP (alors BNM-LPTF) développe sa première horloge à atomes froids pour réaliser la seconde du SI, une fontaine atomique, l'idée d'une référence primaire de fréquence en orbite s'impose aux métrologues. De fait, au sein d'une fontaine, un nuage d'atomes est refroidi par laser, puis lancé verticalement avant de retomber par gravité ; ce faisant, il traverse une cavité micro-onde où est mesurée avec précision la fréquence de la transition atomique recherchée. Or comme le précise Philippe Laurent, chercheur CNRS et responsable scientifique de PHARAO au LNE-OP, « dans l'Espace, les atomes ne tombent pas. On peut alors choisir des vitesses de lancement beaucoup plus faibles, et ainsi réduire des effets systématiques qui déplacent la fréquence de la transition atomique, et maximiser leur temps d'interrogation pour obtenir un signal d'une grande finesse ».

Devenue l'élément phare du projet ACES de l'ESA, PHARAO voit sa construction débutée en 2001 par un consortium industriel sous la responsabilité du CNES, en s'appuyant sur le cahier des charges défini par le LNE-OP. « Les techniques exploitées sont similaires à celles d'une fontaine atomique, mais il a fallu faire face aux contraintes considérables d'une qualification spatiale en termes de masse, de volume ou de tenue aux vibrations et à la température. De notre côté nous avons suivi au plus près les développements et avons



☞ Trois questions à...

PHILIPPE LAURENT, CHERCHEUR
ET RESPONSABLE DE PHARAO AU LNE-OP

Qu'est-ce qui a rendu PHARAO possible ?

P.L. : Le LNE-OP, en charge des références nationales de temps et de fréquence, a une expertise technique et scientifique de 1^{er} rang mondial telle qu'il contribue, à lui seul, à 25 % du calcul du Temps Atomique International (TAI). Ce savoir-faire est en partie fondé sur l'excellence des travaux de la communauté française des atomes froids, notamment ceux du Laboratoire Kastler Brossel avec qui nous avons des liens étroits et qui a été notre partenaire dès l'origine du projet PHARAO.

Dès le début, vous avez également pu compter sur le soutien du CNES ?

P.L. : En effet, nous avons proposé PHARAO au CNES en 1994 et avons pu tester un prototype lors de vols paraboliques dès 1997. La collaboration avec le CNES est très bonne, un soutien sans faille dès le début. Et après acceptation de la mission ACES par l'ESA en 2001, nous avons alors bénéficié du savoir-faire du consortium d'industriels réunis pour la construction de l'horloge, notamment Sodern pour la source laser et le tube à ultra vide, Thales pour la source micro-ondes, EREMS pour l'ordinateur de bord, et la Compagnie des signaux pour le logiciel de vol.

PHARAO a été livrée à l'ESA en 2013 et installée à bord de l'ISS en 2025, l'attente a été longue, non ?

P.L. : Le reste du projet ACES a pris beaucoup de retard d'où ce délai important. Quoi qu'il en soit, notre attente n'a pas été vaine car PHARAO fonctionne au-delà des espérances. Depuis la mise en orbite, les opérations à bord sont contrôlées par le Centre d'Aide au Développement des Activités en Micropesanteur et des Opérations Spatiales (CADMOS) du CNES à Toulouse, avec qui les contacts sont quotidiens. Et, trois fois par semaine, une réunion avec l'ensemble des collaborateurs d'ACES permet de planifier le programme scientifique et technique. Pendant les trois ans de la mission, nous avons bien l'intention de tirer profit au maximum de cette horloge unique !

PROJET PHARE



VUE DE LA CHARGE UTILE ACES INSTALLÉE À L'EXTÉRIEUR DU MODULE COLOMBUS DE L'ISS

participé à de nombreux tests critiques de sous-ensembles jusqu'à la validation de l'horloge complète », commente le physicien, ce qui fait du LNE-OP, le seul laboratoire au monde à avoir développé un étalon primaire de fréquence pour l'Espace.

Outre PHARAO, le LNE-OP est également impliqué dans le projet ACES lui-même, en tant que station de référence réceptrice au sol, pour comparer l'échelle de temps générée dans l'Espace par PHARAO et celles au sol, par les horloges atomiques du laboratoire. Enfin, le LNE-OP est aussi le centre d'analyse scientifique de l'ensemble des données de comparaison des fréquences et échelles de temps.

Presque un an après son lancement, l'horloge spatiale a montré une fiabilité remarquable. La mission ACES est en cours de validation opérationnelle avec les tests des stations Sol en France, en Allemagne, au Royaume-Uni, au Japon et aux États-Unis. Et les premières comparaisons ont déjà permis de montrer que le temps s'écoule plus vite dans un champ gravitationnel plus faible, donc qu'au sol, tel que prévu par la théorie einsteinienne de la gravitation. « À ce stade, nous sommes proches de la meilleure expérience sur la mesure de cet effet. Mais en accumulant les comparaisons, nous irons bien au-delà », précise le chercheur.

PHARAO a été conçue dans le but de réaliser des tests de physique fondamentale inaccessibles sur Terre. Et le haut niveau des développements métrologiques nécessaires à sa mise en œuvre en fait aussi un instrument de choix pour faire progresser la métrologie du temps-fréquence, en particulier dans la perspective de la redéfinition de la seconde prévue à l'horizon 2030.

À cette date, une définition de l'unité de temps fondée sur une ou plusieurs transitions atomiques dans le domaine des fréquences optiques remplacera l'actuelle définition fondée sur une transition micro-onde de l'atome de césium. Dans ce but, l'un des enjeux est de pouvoir comparer les différentes horloges optiques opérationnelles à travers le monde. Si un réseau fibré permet ainsi des comparaisons entre l'Allemagne (PTB), l'Italie (INRIM) et le Royaume-Uni (NPL), tel n'est pas le cas avec les autres continents. Mais grâce



ARRIMAGE DE ACES, PAR LE BRAS ROBOTIQUE, À L'EXTÉRIEUR DU LABORATOIRE COLOMBUS DE L'ISS

à ACES-PHARAO, une liaison par l'Espace permettra également d'intégrer aux comparaisons les horloges états-uniennes du NIST et japonaises du NMIJ avec le même degré d'incertitude. « Des discussions sont en cours pour nous coordonner au niveau mondial », précise Philippe Laurent. Le moins que l'on puisse attendre de la part de spécialistes du temps !

PRIX BALZAN : CHRISTOPHE SALOMON, RESPONSABLE SCIENTIFIQUE DE LA MISSION SPATIALE EUROPÉENNE ACES/PHARAO, RÉCOMPENSÉ.

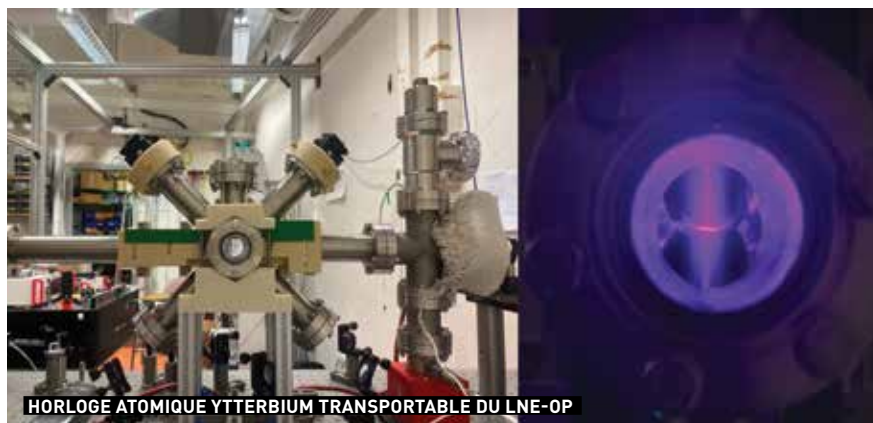
Le Prix Balzan 2025 a été décerné à Christophe Salomon pour ses travaux pionniers sur les atomes ultra-froids pour la fabrication d'horloges atomiques. Directeur de recherche émérite au CNRS, Christophe Salomon travaille au Laboratoire Kastler Brossel.

Il est membre de l'Académie des sciences, de la Société américaine de physique et de la Société européenne de physique. Spécialiste de renommée internationale des atomes refroidis par laser et des gaz quantiques, ses réalisations incluent le développement de fontaines atomiques en collaboration avec le LNE-OP. Il est actuellement le responsable scientifique de la mission spatiale européenne ACES/PHARAO.

Et le LNE bénéficie de ses talents en tant que président du Comité de la Métrologie institué auprès du LNE pour gérer le RNMF, réseau national de la métrologie française.

DE L'YTTERBIUM POUR UNE RÉFÉRENCE DE FRÉQUENCE OPTIQUE « TRANSPORTABLE »

À l'horizon 2030, la seconde du SI sera redéfinie à partir d'une ou plusieurs transitions atomiques dans le domaine optique, offrant la possibilité de réaliser l'unité de temps avec une exactitude 100 fois meilleure. Ce faisant, la métrologie du temps-fréquence aura de nouvelles applications, notamment en géodésie chronométrique. Dans cette perspective, le LNE-OP développe depuis 2021 une horloge optique transportable qui permettra de mesurer des écarts d'altitude avec une précision inégalée.



HORLOGE ATOMIQUE YTTERBIUM TRANSPORTABLE DU LNE-OP

RODOLPHE LE TARGAT, LAURÉAT DE LA FONDATION SIMONÉ ET CINO DEL DUCA

Pour ses travaux sur les horloges optiques transportables et leur application à la géodésie chronométrique, Rodolphe Le Targat, chercheur au LNE-OP, a reçu en 2025 une subvention Del Duca dans la catégorie « Sciences de l'Univers et leurs applications ».

Sur proposition d'un jury composé de membres de l'Académie des sciences, cette dotation permettra de perfectionner la stabilisation en fréquence des lasers de refroidissement, de piégeage et d'interrogation des atomes de l'horloge optique transportable du laboratoire. Une étape essentielle en vue de son déploiement sur le terrain.



REMISE DU PRIX DEL DUCA À RODOLPHE LE TARGAT À L'ACADÉMIE DES SCIENCES, PAR SON PRÉSIDENT SORTANT ALAIN FISCHER

Cette nouvelle application des horloges atomiques est issue de la théorie de la relativité générale selon laquelle le temps s'écoule en proportion du potentiel gravitationnel du lieu considéré, donc de son altitude. C'est pourquoi, les métrologues ont mené dès 2021 le projet ANR ROYMAGE, pour concevoir plusieurs dispositifs de refroidissement et de piégeage, devant aboutir à deux horloges transportables fondées sur une transition de l'ytterbium. Comme l'explique Rodolphe Le Targat, son responsable, « avec cet élément, le contrôle du confinement des atomes est plus aisé qu'avec d'autres éléments ».

En outre, les chercheurs poursuivent leurs travaux dans le cadre du projet EURAMET TOCK qui a pour but de comparer les horloges optiques transportables des partenaires du projet européen. De leur côté, les physiciens du LNE-OP ont pour objectif d'observer leurs premiers signaux d'horloge Yb au cours de l'année 2026, avant de comparer leurs horloges à distance. À terme, ces dispositifs permettront de mesurer des écarts d'altitude de 1 cm entre deux points du globe, quelle que soit la distance qui les sépare, contre environ une dizaine de centimètres aujourd'hui.

« MESURER DES ÉCARTS D'ALTITUDE AVEC DES HORLOGES ATOMIQUES »

UN ALGORITHME IA HYBRIDE POUR LA DÉTECTION DE RADIONUCLÉIDES *IN SITU*

La surveillance radiologique de l'environnement ou le démantèlement nucléaire requiert des méthodes d'analyse, rapides et robustes, de spectres d'émission gamma mesurés, pour identifier et quantifier des radionucléides, notamment à faible statistique de comptage. Dans le cadre d'une thèse de doctorat soutenue en 2025, le LNE-LNHB a développé un algorithme hybride de « démélange » spectral, qui permet d'identifier les radionucléides, en prenant en compte l'influence des interactions gamma dans l'environnement de mesure. Ce travail s'inscrit dans la continuité de recherches antérieures qui avaient abouti au développement d'une méthode de type « problème inverse », permettant de quantifier les radionucléides à partir d'un modèle de mélange de signatures spectrales.

Afin d'élargir le domaine d'application de cet algorithme, les métrologues lui ont adjoint un « auto-encodeur », permettant l'apprentissage automatique des variations de la réponse d'un détecteur pour différents radionucléides en fonction de l'environnement d'interaction des photons émis. « *Par rapport aux méthodes d'identification exclusivement fondées sur l'apprentissage de bout en bout, nous avons gagné un*

facteur 10 sur la justesse de la quantification », précise Christophe Bobin, chercheur au LNE-LNHB.

Dans une prochaine étape, les chercheurs vont tester l'algorithme hybride avec des données réelles de mesures de démantèlement d'installations nucléaires. À terme, l'analyse de la déformation des spectres gamma devrait permettre de déterminer l'épaisseur de bétons non contaminés, et ainsi d'optimiser le tri des déchets.



UN PONT DE RÉSISTANCE POUR LA THERMOMÉTRIE PAR SONDE SThM

L'étude des transferts thermiques radiatifs aux échelles micrométriques se situe à la croisée de la physique fondamentale, d'études appliquées aux matériaux isolants ou aux nanotechnologies et de la métrologie. C'est le cas avec le projet ANR NBodHeat complété d'un projet du RNMF, pour lesquels le LNE a développé un type de pont de mesure de résistance électrique adapté à la mesure de température par sonde locale de microscope à force atomique (SThM).

Issu des savoir-faire en métrologie électrique quantique du LNE, ce dispositif a été mis en œuvre pour le projet ANR par un doctorant, dirigé conjointement par le LNE et l'Institut Langevin/ESPCI avec le soutien de LCF/IOGS, pour étudier les transferts radiatifs de chaleur entre une microsphère et un plan de verre, ou entre deux microsphères.

« Grâce à un protocole de mesure optimisé, nous avons mesuré des variations de température avec une résolution de $100 \mu K$ et mis en évidence un mode d'échange radiatif associé à l'effet tunnel de photons qui survient en champ proche », explique Wilfrid Poirier, directeur de recherche au LNE. Fort de ces résultats novateurs, l'étudiant a brillamment soutenu sa thèse en septembre 2025.

Deux ponts de ce type sont désormais déployés sur la plateforme de l'Institut Langevin pour mener des expériences fondamentales et étudier par exemple les transferts thermiques au sein de la laine de verre sous vide. De son côté, le LNE développe un troisième pont pour mesurer des propriétés thermiques de nanomatériaux.

Voir résultats publiés : Guillemot et al., Phys. Rev. Lett., 134, 193801, 2025.

T4K : UNE RÉFÉRENCE DE TEMPÉRATURE POUR TESTER LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

La plateforme « T4K » du LNE-CNAM, centrée sur un réfrigérateur à dilution* de nouvelle génération, permet d'atteindre des températures inférieures à 4 K. Et grâce à la thèse de doctorat soutenue en 2025, elle intègre désormais l'échelle EPBT-2000, référence de température entre 0,9 mK et 1 K, faisant de T4K un outil métrologique indispensable pour caractériser les technologies quantiques.

L'échelle EPBT-2000, fondée sur la relation unique entre la pression de fusion de l'hélium-3 et sa température, est le socle pour déterminer la température d'un mélange liquide-solide d'³He en mesurant sa pression. Pour qualifier un tel dispositif implanté sur T4K, les métrologues l'ont comparé à leur thermomètre à bruit magnétique, qui réalise la définition SI du kelvin. Comme l'expose Clément Tausin, chercheur au LNE-CNAM, « entre 8 mK et 1 K, nous avons montré que l'écart entre les températures mesurées avec les deux types de thermomètres était inférieur à 0,2 % », conférant le statut de référence primaire au dispositif EPBT-2000 du laboratoire.

Avec ces résultats, le LNE-CNAM devient un des seuls laboratoires de métrologie au monde capable d'étalonner des thermomètres en dessous de 1 K. Et cela fait du laboratoire un partenaire central du projet Cryonext, sur la cryogénie

haute performance, et un référent national pour les très basses températures au sein du programme MetriQs-France, tous deux émanant de la Stratégie Nationale Quantique en soutien au déploiement des technologies quantiques.

* Action financée par la Région Île-de-France

« LA PLATEFORME T4K EST UN OUTIL MÉTROLOGIQUE DE RÉFÉRENCE POUR CARACTÉRISER LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES »



RÉFÉRENCES DE TEMPÉRATURE DANS LE RÉFRIGÉRATEUR À DILUTION DE LA PLATEFORME T4K DU LNE-CNAM

KILOGRAMME DÉMATÉRIALISÉ : LE LNE AU MEILLEUR NIVEAU EUROPÉEN

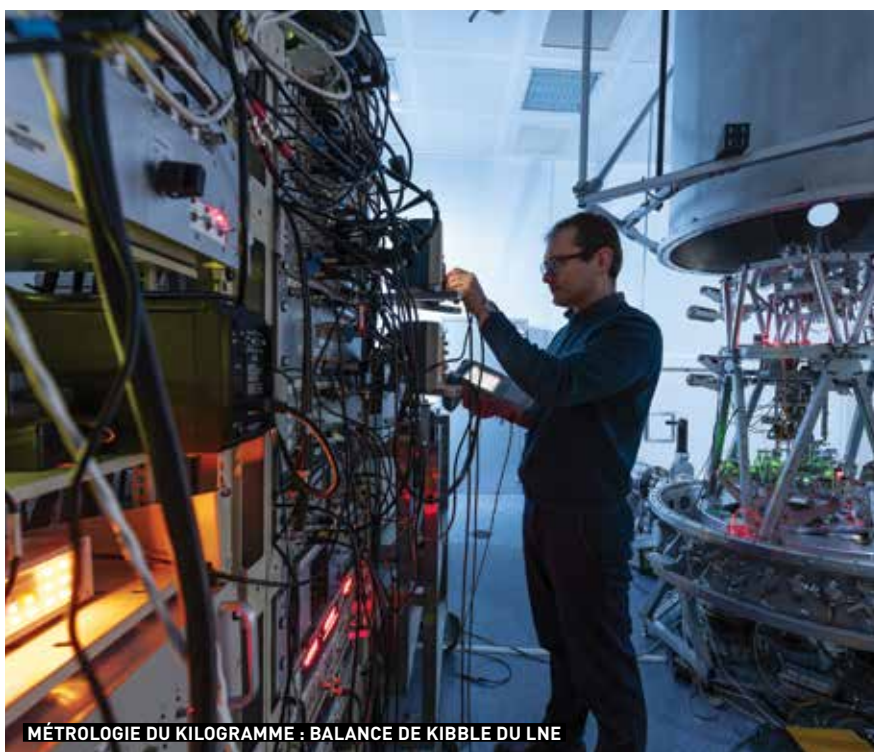
Depuis 2019, l'unité de masse est définie à partir de la constante de Planck, h , constante fondamentale de la mécanique quantique. Au LNE, sa mise en œuvre se fonde sur le dispositif de balance de Kibble, grâce auquel le poids d'une masse est équilibré avec une force électromagnétique raccordée au SI via des étalons quantiques électriques. En 2025, le laboratoire a publié ses travaux réalisés et ses résultats obtenus, notamment lors de la comparaison internationale pratiquée désormais périodiquement, afin d'attribuer une valeur à un étalon du kilogramme, matérialisation de l'unité de masse.

Séquençage des mesures, critères d'asservissement, remplacement du moteur de la phase dynamique... de nombreuses améliorations apportées à leur instrumentation au fil du temps.

Résultat : « lors de deux campagnes de mesures, nous avons respectivement atteint une incertitude relative de mesure de $3,1 \times 10^{-8}$ et $3,5 \times 10^{-8}$ avec la balance de Kibble du LNE », se félicite Matthieu Thomas, responsable de cet équipement de référence au LNE.

Ces résultats placent le LNE au meilleur niveau européen, le rapprochant de la cible de 2×10^{-8} définie par le comité Masse du CIPM pour permettre, à terme, à un pays de réaliser le kilogramme SI indépendamment de la valeur consensuelle adoptée en 2019.

En attendant, les résultats du LNE ont été transmis au BIPM début 2025 qui établit la valeur consensuelle pour le kilogramme comme moyenne de valeurs mesurées par une dizaine de laboratoires nationaux de métrologie dans le monde.



MÉTROLOGIE DU KILOGRAMME : BALANCE DE KIBBLE DU LNE

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES (HDR) OBTENUE EN 2025

Yves Menesguen (LNE-LNHB)

4 avril 2025

« Quantification élémentaire par fluorescence X et applications en métrologie des rayons X »
Sorbonne Université, Physique

Bess Fang-Sortais (LNE-OP)

26 juin 2025

“Cold-atom gyroscopes and spectral-hole referenced ultra-stable lasers”
Observatoire de Paris, PSL

Clément Lacroûte (LNE-LTFB)

16 octobre 2025

« Cavités Fabry-Perot ultra-stables et pièges à ions à électrodes surfaciques pour la métrologie des fréquences optiques »
Université Marie et Louis Pasteur, Besançon, ED 37 SPIM

Michaël Petit (LNE-ASNR)

13 novembre 2025

« Les données nucléaires : contributions et utilisations »
Université d'Aix-Marseille, ED 353 SPI, Physique nucléaire

THÈSES DE DOCTORAT SOUTENUES EN 2025

LNE

Louis-Ferdinand Lafon - 31 mars 2025
"Robust reference algorithms and softgauges for data fusion-based methods of measured data on 3D objects"
 Université Paris-Saclay, Saclay, ED 579 SMEMAG, Génie mécanique

Sarah Douri - 26 mai 2025
"Establishment of metrological references for the measurement of thermal conductivity by scanning thermal microscopy"
 Université de Lyon, INSA-Lyon, ED 162 MEGA, Thermique-Énergétique

Daouda Seck - 1^{er} décembre 2025
 « Conception et développement d'étalons de paramètres S pour la caractérisation des nanodispositifs Haute Fréquence »
 Université de Lille, IEMN, ED 632 ENGSYS, Nanoélectronique et micro-ondes

Miguel Da Silva - 17 décembre 2025
 « Méthodologie d'évaluation générique de systèmes robotiques collaboratifs intelligents »
 Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Gif sur Yvette, ED 580 STIC, Automatique

Thèses externes co-encadrées par LNE :

Malik Enniafa (INSA/LVA) - 11 juillet 2025
 « Modélisation d'une chaîne de mesure incluant un tomographe pour estimer les incertitudes de mesure dimensionnelle sur des pièces issues de fabrication additive »
 Université de Lyon, INSA-Lyon, ED 160 EEA, Traitement du signal et de l'image

Hadi Nasser (UGE/IMSE) - 19 septembre 2025
"Physics-based and adaptive multi-fidelity models for fast estimation of wall thermal properties in presence of several sources of uncertainty"
 Université Gustave Eiffel, Marne-la-Vallée, ED 532 MSTIC, Mathématiques

Victor Guillemot (ESPCI/IL) - 26 septembre 2025
 « Thermométrie à sonde locale pour l'étude des transferts radiatifs de chaleur à petite échelle »
 Université PSL, ESPCI, Paris, ED 564 PIF, Physique

Prajit Thazhurazhikath Rajendran (CEA/List) - 11 décembre 2025
"Expert-in-the-loop learning and adaptation under uncertain and unpredictable situations in AI-based autonomous systems"
 Université Paris-Saclay, CEA-Saclay, ED 580 STIC, Informatique

LNE-CNAM

Clément Tausin - 27 mai 2025
"Thermometry below 1 K"
 Conservatoire national des arts et métiers, Paris, ED 432 SMI, Métrologie

LNE-LNHB

Clément Besnard-Vauterin - 8 octobre 2025
 « Développement d'une méthode innovante de détection des matières illicites basée sur la spectrométrie des photoneutrons »
 Université Paris-Saclay, Saclay, ED 576 PHENIICS, Physique nucléaire

Dinh Triem Phan - 14 octobre 2025
"AI algorithms for gamma-ray spectrometry dedicated to field measurement"
 Université Paris-Saclay, Saclay, ED 580 STIC, Sciences du traitement du signal et des images

Gaël Craveiro - 5 décembre 2025
"Experimental study of forbidden beta transitions"
 Université Paris Saclay, Saclay, ED 576 PHENIICS, Physique nucléaire

LNE-ASNR

Enya Mobio - 23 avril 2025
 « Conception d'un champ neutronique majoritairement épithermique et sa caractérisation : mesures par activation neutronique de feuilles de ¹⁹⁷Au et développement d'une méthode originale utilisant le nouveau détecteur Neutron Flux Monitor »
 Université Grenoble Alpes, ED PHYS, Physique appliquée

Diane Quevauvilliers - 26 novembre 2025
 « Caractérisation de scintillateurs stilbène et EJ309 pour la métrologie et la spectrométrie des neutrons entre 100 keV et 22 MeV sur AMANDE et CEZANE »
 Université d'Aix-Marseille, ED 353 S- Sciences Pour l'Ingénieur, Physique nucléaire

LNE-OP

Luc Archambault - 19 mai 2025
 « Étude des performances ultimes d'une horloge compacte à atomes refroidis par laser »
 Sorbonne Université, Paris, ED 564 PIF, Physique

Rayan Si Ahmed - 23 juillet 2025
 « Outils de modélisation pour évaluer les performances ultimes des interféromètres atomiques »
 Sorbonne Université, Paris, ED 564 PIF, Physique

Miguel Cifuentes Marin - 23 septembre 2025
"Laguerre-Gaussian shaped lattices for a strontium optical clock"
 Université Paris Sciences et Lettres, Observatoire de Paris, ED 564 PIF, Physique

Fatima Rahmouni - 25 septembre 2025
"Development of an Optical Lattice Clock Based on Neutral Ytterbium: Towards Transportability and Chronometric Geodesy"
 Sorbonne Université, Observatoire de Paris, PSL, ED 564 PIF, Physique

Diego Alejandro Lancheros Naranjo

1^{er} octobre 2025
"Characterization of systematic errors due to intensity inhomogeneities of Raman beams in a cold-atoms absolute gravimeter"
 Sorbonne Université, Observatoire de Paris, PSL, ED 564 PIF, Physique

LNE-LTFB

Martin Hauden - 19 mars 2025
"Stable references for a superradiant ytterbium laser"
 Université Marie et Louis Pasteur, SupMicrotech-ENSMM, Besançon, ED 37 SPIM, Optique et photonique

Martina Matusko - 3 avril 2025
"Toward a superradiant laser: ytterbium atomic ensemble and metrological developments for ultra-stable frequency references"
 Université Marie et Louis Pasteur, Besançon, ED 37 SPIM, Sciences pour l'ingénieur

Juliette Breurec - 26 septembre 2025
 « Horloge atomique compacte à cellule de césium de haute performance »
 Université Marie et Louis Pasteur, Besançon, ED 37 SPIM, Sciences pour l'ingénieur

Einstein Giner Huayanay Ostos
 3 décembre 2025
 « L'oscillateur HBAR intégré à vieillissement contrôlé et faible consommation »
 Université Marie et Louis Pasteur, Besançon, ED 37 SPIM, Sciences pour l'ingénieur

Josipa Madunic - 11 décembre 2025
"Setup and preliminary characterization of a surface-electrode Paul trap for frequency metrology"
 Université Marie et Louis Pasteur, SupMicrotech-ENSMM, Besançon, ED 37 SPIM, Sciences pour l'ingénieur

Jana El Badawi - 16 décembre 2025
 « Développements théoriques et expérimentaux pour un laser superradiant continu »
 Université Marie et Louis Pasteur, Besançon, ED 37 SPIM, Sciences pour l'ingénieur

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

➡ Suivez-nous sur les réseaux sociaux :   

Rédaction : Mathieu Grousson / LNE - Réalisation : Esquif Communication - Mars 2026

Crédits photos : Philippe Stroppa : couverture, p. 3, p. 13, p. 17, p. 19, p. 20, p. 21, p. 23, p. 28, p. 32, p. 35, p. 41 - LNE : p. 8, p. 9, p. 10, p. 16, p. 17, p. 18, p. 22, p. 23, p. 25, p. 30, p. 34 - Istock : p. 11, p. 27, p. 31, p. 29 - AdobeStock : p. 12, p. 39 - Cetiati : p. 14, p. 15 - Lucie Pochet : p. 24 - Daniela Istrate : p. 26
LNE-CNAM : p. 29, p. 40 - Philippe Laurent : p. 36 - NASA : p. 37 - LNE-LTE/Observatoire de Paris : p. 38 - Académie des sciences - Mathieu Baumer : p. 38

ISSN 2826-1577

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

