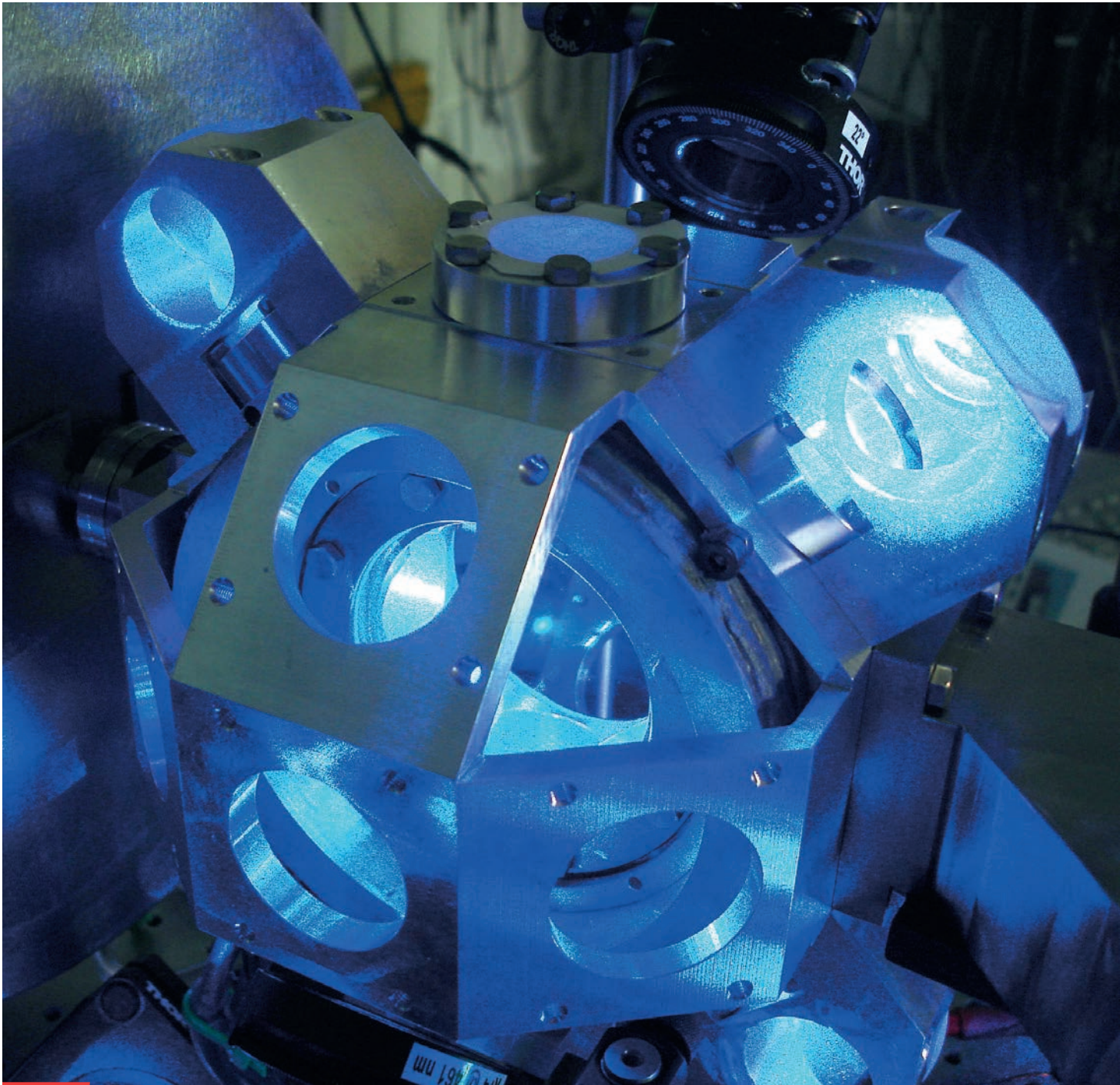




RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

LABORATOIRE
NATIONAL
DE MÉTROLOGIE
ET D'ESSAIS



RAPPORT RECHERCHE
2022

EDITORIAL



« LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE EST INCONTOURNABLE À L'ÉCHELLE EUROPÉENNE COMME AU NIVEAU MONDIAL. »

THOMAS GRENON,
DIRECTEUR GÉNÉRAL

2022 a vu la tenue de la 27^e édition de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM), du 15 au 18 novembre au Palais des Congrès de Versailles, conférence qui se réunit tous les quatre ans. Cet événement qui réunit 51 pays revêt toujours un caractère particulier pour la communauté de la métrologie française, la France étant dépositaire de la Convention du Mètre depuis 1875, et de fait accueillant cette conférence présidée par le président de l'Académie des sciences que j'ai eu l'honneur d'ouvrir au nom de l'Etat français.

Lors de la CGPM, une feuille de route a été adoptée pour la mise en place de la nouvelle définition de la seconde qui devrait intervenir en 2030. Alors que le LNE-SYRTE contribue aujourd'hui pour 40 % à l'étalonnage primaire du Temps Atomique International (TAI), les travaux actuellement menés confirment sa position centrale pour la préparation de l'adoption de cette future définition. La numérisation a aussi été un sujet clé, que nous retrouverons dans les années qui viennent que ce soit pour la métrologie ou les essais.

Par ailleurs, 2022 a vu le démarrage du nouveau programme européen en métrologie EPM (*European Partnership on*

Metrology). 16 projets avaient été retenus dès la fin 2021, et 25 nouveaux projets ont été sélectionnés l'année dernière, avec une dominance sur le numérique, la santé et la métrologie intégrée. Signe du caractère incontournable de la métrologie française sur le continent, la France participe à 22 de ces projets. Elle est par ailleurs très impliquée dans de nombreux Réseaux Européens en Métrologie (EMN), parmi lesquels on peut citer POLMO, le plus récent, dédié à la surveillance de la pollution, dont la mise en place a été portée par le LNE, et Mathmet, qui regroupe la communauté des mathématiciens et spécialistes des méthodes statistiques pour la métrologie, dont la conférence a été organisée par le LNE et l'ENSAM en novembre dernier.

Je voudrais enfin souligner l'arrivée à échéance en 2022 de nombreux programmes sur des problématiques de santé, dans lesquels ont été impliqués les scientifiques du LNE. Ces programmes ont mobilisé un grand nombre de disciplines, de la chimie aux mathématiques, en passant par la débitmétrie, l'électricité ou encore les rayonnements ionisants. Je me réjouis de l'investissement de la métrologie française sur les grands enjeux industriels et sociétaux de notre temps.

SOMMAIRE

- Éditorial 3
- Carte d'identité du LNE et du Réseau national de la métrologie française 6
- La métrologie mondiale s'était donné rendez-vous 8
- La métrologie française du temps incontournable dans la mise en place de la future seconde 10
- Prix LNE de la Recherche 2022 13
- La métrologie chimique du LNE, une équipe de recherche multicarte au service de la société 14



COMPÉTITIVITÉ INDUSTRIELLE

- Métrologie des grands volumes, le laboratoire LNE-Cnam déploie ses ailes 16
- CARMEN III : la complexité du nano-monde à portée de mesure 19
- Contrôle qualité : la spectroscopie par résonance ultrasonore au service de la fabrication additive 19
- Mesure de volumes complexes : le LNE réduit les incertitudes 20
- Source de neutrons: un nouveau moyen d'étalonnage pour les faibles débits d'émission 20
- La traçabilité au SI des mesures électriques à haute fréquence up-datées 21
- Un modèle hybride pour prédire le comportement au feu de profilés en bois composite 21
- La parole à... Carole Berrard (CITEO) 23



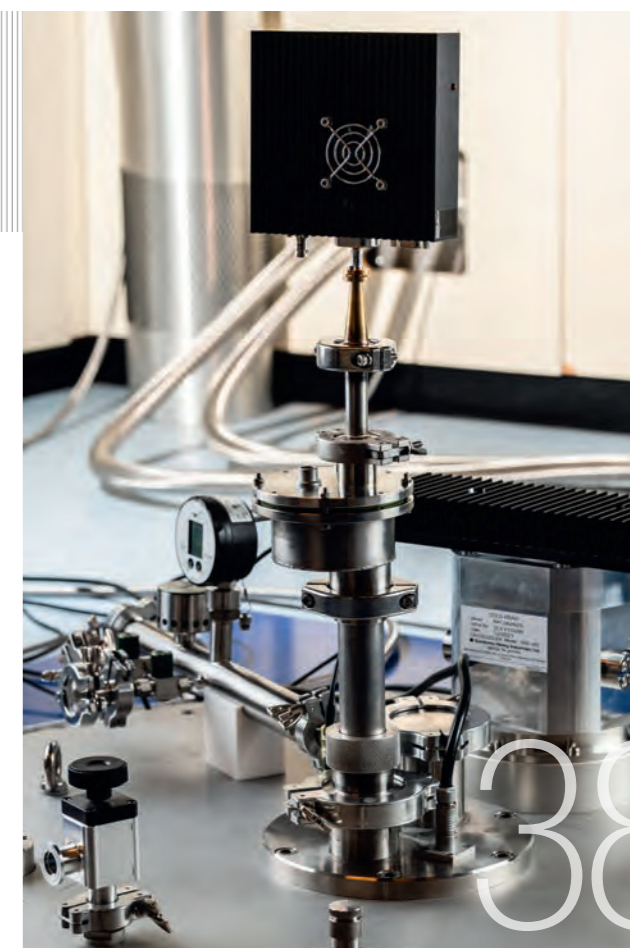
TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

- La débitmétrie des gaz renouvelables en voie de normalisation 25
- Le réseau européen de métrologie POLMO officialisé 27
- Forts courants à haute fréquence : incertitude de mesure réduite d'un facteur 10 27
- Les hautes puissances électriques pulsées, ultra brèves, ont désormais leur étalon 28
- Le suivi de l'environnement accède à la précision quantique 28
- La parole à... Guillaume Jubeaux (BIOMAE et Association France Eau Biosurveillance) 29



SANTÉ ET SÉCURITÉ DES CITOYENS

- Une nouvelle référence nationale pour fiabiliser l'injection de médicaments 31
- Une méthode de référence pour le dosage de la procalcitonine 33
- La protéine Tau, un marqueur désormais tracé de la maladie d'Alzheimer 33
- Une plateforme pour la validation de systèmes automatiques de détection des maladies cardiovasculaires 34
- L'imagerie médicale entre dans l'ère de la mesure 34
- Radiothérapie X à faible énergie : le raccordement au SI est désormais possible 35
- Téléphones portables, leurs émissions désormais traçables au SI 35
- La parole à... Évelyne Escarmant (Stago) et Pierre Grandet (Diabeloop) 37



MÉTROLOGIE FONDAMENTALE

- L'ampère quantique a désormais son laboratoire 39
- La métrologie de l'apparence prête pour des mesures dans le SI 40
- MATHMET, un réseau européen à la croisée des mathématiques et de la métrologie 41
- THÈSES DE DOCTORAT SOUTENUES EN 2022 42
- FÊTE DE LA SCIENCE - PORTES OUVERTES DU LNE 43

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.



En décembre 2022, le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire a signé le renouvellement, pour les 5 prochaines années (2023 - 2027), de la **qualification du LNE** en tant qu'**Institut Technique Agro-Industriel (ITA)**. Cette qualification s'inscrit dans la continuité des missions du LNE vis-à-vis des pouvoirs publics et des industriels (expertise et formation) dans le domaine de la sécurité sanitaire des aliments pour lesquelles le LNE dispose d'un parc analytique remarquable. Elle valide aussi l'évolution des outils du LNE, développés pour répondre aux futurs besoins des industries de l'agro-alimentaire sur les aspects de la réglementation et de la sécurité alimentaire. Le Conseil Scientifique et Technique de l'ACTIA (le réseau français des instituts techniques de l'agro-alimentaire) a souligné l'expertise des équipes du LNE sur les caractérisations de matériaux et les outils de prévision, ainsi que la pertinence des orientations prises pour étudier les matériaux recyclés, réemployés ou biosourcés qui permettront de répondre aux futurs enjeux économiques et sociétaux.

LA RECHERCHE AU LNE EN 2022

25 %
du budget global du LNE

130
docteurs et ingénieurs

22
doctorants

92
publications dans des revues
à comités de lecture

Un portefeuille
de **18** brevets

LA RECHERCHE DU RNMF EN 2022

Plus de **290** scientifiques

155
projets de recherche
dont **66** JRP
(EURAMET Joint Research Projects)

+ de 130
publications dans des revues
à comités de lecture

73
thèses en préparation
dont **18** soutenues en 2022

LE RÉSEAU NATIONAL DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE (RNMF)

LNE-CNAM

Le laboratoire commun de métrologie entre le LNE, à Paris et à Trappes, et le Conservatoire national des arts et métiers (Cnam), à La Plaine-Saint-Denis, intervient pour la métrologie des longueurs et grandeurs dimensionnelles, des rayonnements optiques, de la température et des grandeurs thermiques, de la masse et des grandeurs apparentées (pression, force, couple, acoustique, accélérométrie, viscosité).

LNE

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

LNE-LNHB

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

LNE-SYRTE

Le laboratoire des Systèmes de Référence Temps-Espace, sur le site de l'Observatoire de Paris-PSL, est responsable des références nationales de temps et de fréquence et de gravimétrie.

LNE-CETIAT

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

LNE-ENSAM

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

LNE-IRSN

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

LNE-LADG

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

LNE-LTFB

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

LNE-TRAPIL

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

LA MÉTROLOGIE MONDIALE S'ÉTAIT DONNÉ RENDEZ-VOUS

DU 15 AU 18 NOVEMBRE DERNIER S'EST TENUE LA 27^E CONFÉRENCE GÉNÉRALE DES POIDS ET MESURES (CGPM), À VERSAILLES. ELLE A RASSEMBLÉ LES REPRÉSENTANTS DES ÉTATS PARTIES À LA CONVENTION DU MÈTRE ET DES ÉTATS ET ENTITÉS ASSOCIÉS À LA CGPM. 51 ÉTATS MEMBRES PARTICIPANTS, PRÉSENTS OU EN LIGNE, ONT RÉAFFIRMÉ L'IMPORTANCE DE LA MÉTROLOGIE DANS LES ENJEUX ÉCONOMIQUES, SOCIÉTAUX ET ENVIRONNEMENTAUX.



27^e CONFÉRENCE GÉNÉRALE DES POIDS ET MESURES (CGPM)

C'était un moment vraiment exceptionnel, témoigne Maguelonne Chambon, directrice de la recherche scientifique et technologique de LNE. Du fait de la crise sanitaire, c'était la première fois que nous nous rassemblions depuis trois ans. Nous étions toutes et tous ravis de pouvoir à nouveau échanger en direct. Comme tous les quatre ans, la communauté métrologique mondiale s'était en effet donné rendez-vous à Versailles, du 15 au 18 novembre dernier, pour la Conférence générale des poids et mesures. Une rencontre éloignée des feux de l'actualité mais qui, comme le rappelle Noël Dimarcq, président du Comité Consultatif du Temps et des Fréquences (CCTF) au sein du Comité international des poids et mesures (CIPM), «est l'occasion de valider

la stratégie globale de la métrologie internationale, et revêt par conséquent une importance fondamentale, avec des répercussions pour la société dans son ensemble.»

Lors de cette 27^e édition de la CGPM, sous la présidence française de Patrick Flandrin, alors président de l'Académie des sciences, d'importantes résolutions ont été adoptées. Certaines revêtent un caractère formel, comme celle réaffirmant la nécessité «d'élaborer une vision à long terme qui veille à ce que le système mondial de mesure demeure pertinent et qu'il réponde de manière adéquate aux nouveaux défis métrologiques.» D'autres, répondant à des besoins ou des situations de tout ce qu'il y a de plus concret, auront des conséquences visibles. C'est par exemple le cas de cette résolution pour

l'adoption de nouveaux multiples et sous-multiples des unités du SI. Ainsi, quecto, ronto, ronna et quetta donnent désormais respectivement un nom aux sous-multiples 10^{-30} et 10^{-27} et aux multiples 10^{27} et 10^{30} des unités. «D'apparence anodine, cette résolution répond à des besoins d'exprimer des valeurs numériques dans le SI au-delà de 10^{24} et en-deçà de 10^{-24} , par exemple dans le domaine de la micro-électronique, de l'astronomie ou encore de la science des données», explique Maguelonne Chambon.

Deux autres résolutions adoptées, très techniques, concernent la métrologie du temps. Ainsi, les conférenciers ont décidé la suppression, au plus tard en 2035, des secondes intercalaires. Seconde intercalaire ? Partout sur la Terre, la référence de temps internationale utilisée est le Temps



Universel Coordonné [UTC] qui a la même marche que le Temps Atomique International [TAI], dont le rythme est fondé sur la seconde élaborée à l'aide d'horloges atomiques. Or, du fait de variations imprédictibles, le temps calculé à partir de l'angle de rotation de la Terre s'écarte du temps UTC. Si bien que, périodiquement, on doit ajouter une seconde intercalaire au temps UTC afin de maintenir la différence entre ces deux Temps inférieure à une seconde. C'est ainsi que depuis 1972, il a fallu compenser un écart de 37 secondes.

Cependant, comme l'explique Noël Dimarcq, «chaque discontinuité de UTC fait courir un risque grave de dysfonctionnement d'infrastructures numériques.» D'où la décision de s'affranchir de cette contrainte de coordination en augmentant la différence tolérable entre le temps lié à la rotation de la Terre et le temps universel coordonné.

Si cette résolution a été à peine discutée, et doit son adoption à la quasi-unanimité à un important travail de conviction des métrologues français, c'est bien la résolution concernant la redéfinition de la seconde, qui devrait être entérinée en 2030, qui a constitué le plat de résistance de la CGPM. Précisément, plusieurs propositions pour refonder l'unité de temps ont déjà été formulées (voir le dossier

page 10). Ainsi, les conférenciers se sont mis d'accord pour que, lors de la prochaine CGPM en 2026, l'option préférée soit proposée, tout en insistant sur la nécessité de poursuivre les recherches sur les étalons de fréquence, notamment optique, et le développement des infrastructures nécessaires à leurs comparaisons et à la dissémination de l'unité vers les utilisateurs (en particulier par la contribution régulière au TAI), permettant ainsi l'adoption effective de la nouvelle définition de la seconde quatre ans plus tard.

Enfin, dans un monde qui change au profit d'une ère numérique, la CGPM invite l'ensemble des laboratoires nationaux de métrologie à développer et à mettre en œuvre un «cadre numérique» au SI». De quoi accroître l'exactitude et la comparabilité au niveau mondial des mesures dans ce monde numérique. Car in fine, dans l'esprit de la Convention du Mètre, dont la Conférence a invité à marquer le 150^e anniversaire en 2025, c'est bien l'objectif de la métrologie internationale : avoir un système de mesure commun et utilisable partout et par tous. D'où cette dernière résolution adoptée par la CGPM invitant à réfléchir à la manière «de faciliter une adhésion durable et universelle à la Convention du Mètre» de l'ensemble des pays du globe et des organisations internationales.

LE PARTENARIAT EUROPÉEN EN MÉTROLOGIE SUR LES RAILS

Démarré officiellement le 1^{er} décembre 2021, le nouveau programme européen de recherche en métrologie, EPM (European Partnership on Metrology) est devenu vraiment opérationnel en 2022. Ainsi, les 16 projets retenus en 2021 concernant la transition énergétique, le suivi de l'environnement et les aspects normatifs ont pu débuter, dont les 10 incluant des équipes françaises. Pour l'année 2022, un nouvel appel à projets a vu la sélection de 25 projets, dont 22 avec une participation française, sur les thèmes dominants du numérique, de la santé et de la métrologie intégrée. Prévu jusqu'en 2027, l'EPM est doté d'un budget de 690 millions d'euros, financé par la Commission européenne pour 300 M€ et les par les États participants. Il vise à finaliser une intégration pérenne de la métrologie à l'échelle du continent.

«C'ÉTAIT UN MOMENT VRAIMENT EXCEPTIONNEL. DU FAIT DE LA CRISE SANITAIRE, C'ÉTAIT LE PREMIÈRE FOIS QUE NOUS NOUS RASSEMBLIONS DEPUIS TROIS ANS. NOUS ÉTIIONS TOUTES ET TOUS RAVIS DE POUVOIR À NOUVEAU ÉCHANGER EN DIRECT.»

MAGUELONNE CHAMBON, DIRECTRICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE, LNE

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

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



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

«IL EXISTE ACTUELLEMENT UNE DIZAINE DE TRANSITIONS PROMETTEUSES.»

SÉBASTIEN BIZE,
DIRECTEUR DU LNE-SYRTE

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

TROIS OPTIONS POUR LA FUTURE DÉFINITION

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

UNE EXACTITUDE PROCHE DE 10^{-18}

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

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

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

STABILITÉ ET PÉRENNITÉ EN LIGNE DE MIRE

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

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

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

L'HORLOGE PARLANTE S'EST TUE

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

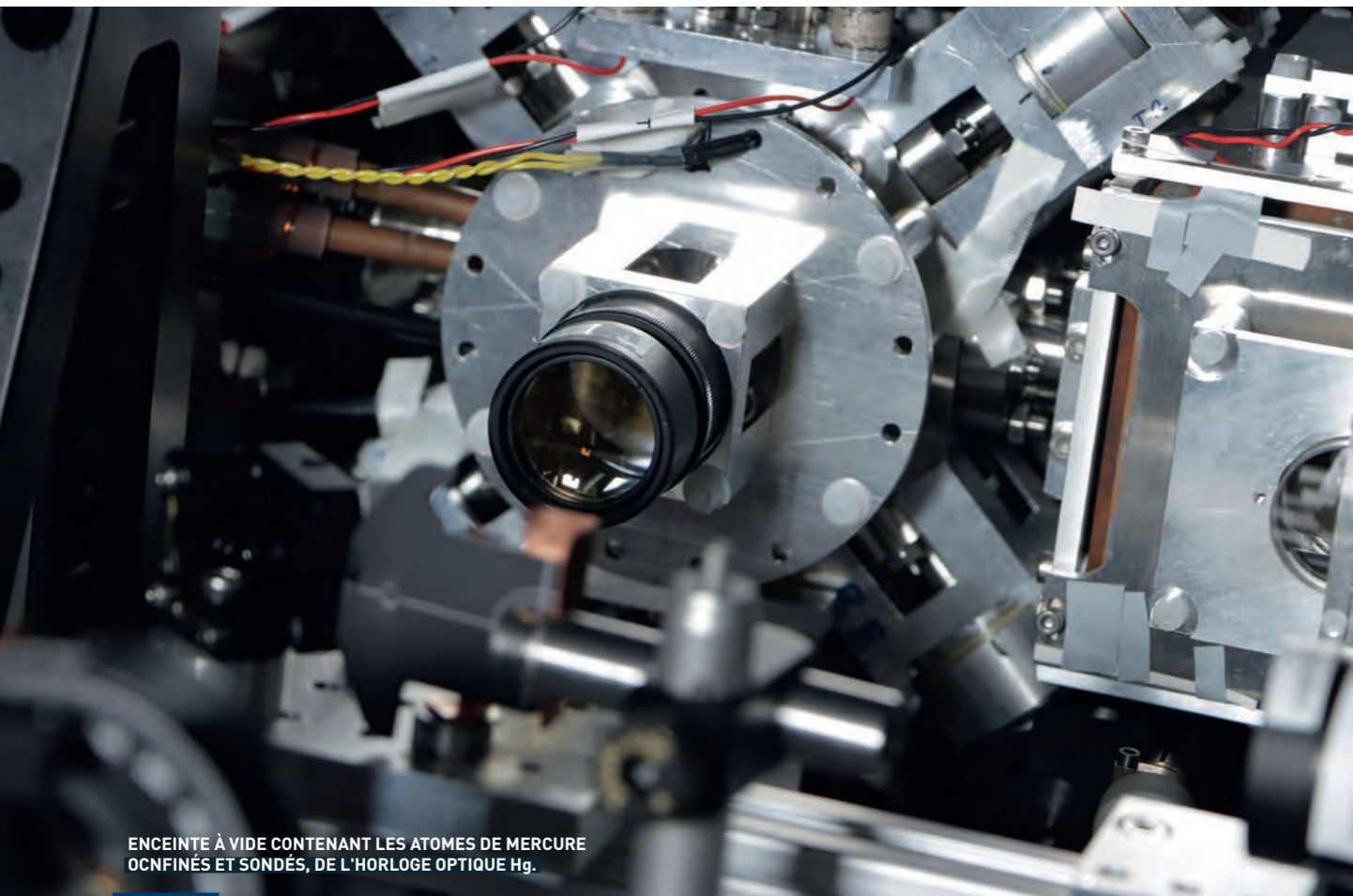
mesure et de comparaison des références optiques, SAMIROF. «SAMIROF inclut également la connexion par réseau fibré de nos horloges à celles d'autres laboratoires en France, pour la dissémination des références de fréquence en différents points du territoire, et dans différents pays de l'Union européenne,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

DES HORLOGES OPTIQUES POUR ÉTALONNER LE TAI

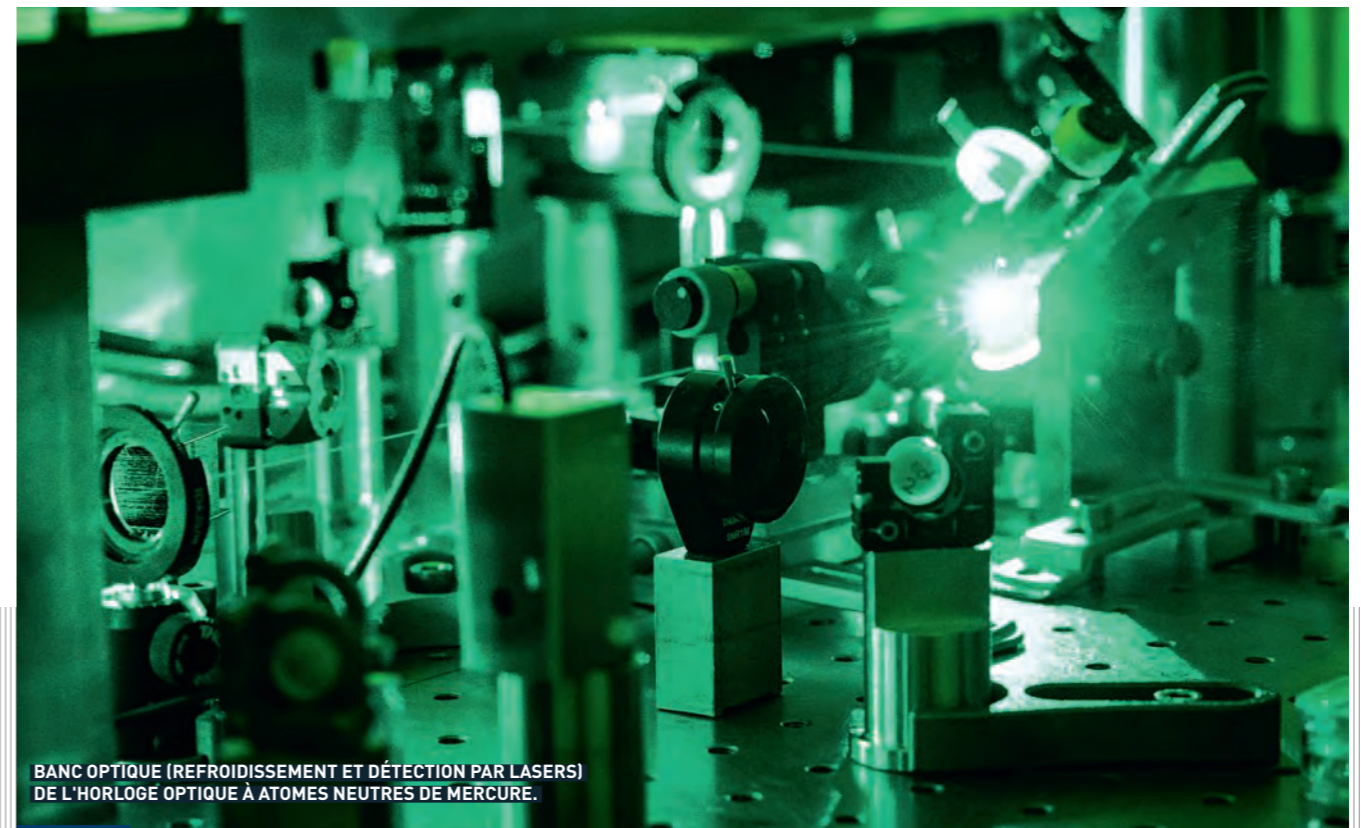
Si le LNE-SYRTE renforce ses moyens de comparaison et de transfert par fibre optique, dans le cadre notamment du projet TORTUE et grâce à l'infrastructure nationale Refimeve, en cours d'extension européenne, en parallèle, le laboratoire continue d'améliorer ses moyens de comparaison intercontinentale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

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

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



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



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

PRIX LNE DE LA RECHERCHE 2022

En 2022, **Sébastien Bize**, directeur du LNE-SYRTE à l'Observatoire de Paris – PSL, a été lauréat du **Prix LNE de la recherche** pour l'ensemble de ses travaux sur la nouvelle génération d'horloges ultra performantes, les horloges à réseau optique, notamment sur le développement actuel d'une horloge utilisant le mercure. Créé en 2009, le prix LNE de la recherche a tour à tour récompensé des chercheurs sur des thématiques aussi variées que les nanotechnologies, la santé, l'environnement, les télécommunications,

l'énergie, le transport les technologies de l'information, ou encore les matériaux. Le LNE a ainsi récompensé plus d'une quinzaine de chercheurs ayant tous su allier science et technique, pour mener des recherches à fort impact pour la science, l'industrie ou la société. En 2022, Sébastien a également été récompensé par le **L'European Frequency and Time Forum (EFTF)** qui lui a attribué l'**European frequency and Time Award**, pour sa contribution exceptionnelle à la métrologie européenne Temps-Fréquence.



LA MÉTROLOGIE CHIMIQUE DU LNE, UNE ÉQUIPE DE RECHERCHE MULTICARTE AU SERVICE DE LA SOCIÉTÉ

L'ÉQUIPE PLURIDISCIPLINAIRE EST CONSTITUÉE DE 4 GROUPES THÉMATIQUES DE RECHERCHE POUR COUVRIR L'ENSEMBLE DES QUESTIONS DE MÉTROLOGIE ASSOCIÉES À LA CHIMIE ET LA BIOANALYSE : POLLUTION, ENVIRONNEMENT, CLIMAT, SANTÉ... SES TRAVAUX SONT AU CŒUR D'ENJEUX SOCIÉTAUX MAJEURS.



La métrologie chimique est une discipline jeune. Pour autant, par l'impact étendu de ses recherches, évolution du climat, surveillance de l'environnement, qualité de l'air, analyses biomédicales, sécurité des aliments... elle n'en est pas moins devenue incontournable, à la croisée des besoins industriels et des nombreuses problématiques sociétales prégnantes. Ainsi, rien d'étonnant à ce que l'équipe de métrologie chimique du LNE, avec sa cinquantaine de collaborateurs dont une trentaine de chercheurs, sa vingtaine minimum (jusqu'à 35 en 2021 !) de publications par an dans des revues à comité de lecture, sa participation à de nombreux projets européens et nationaux, et son implication auprès d'organismes de surveillance ou de normalisation, soit l'une des équipes de recherche les plus actives du laboratoire. Concrètement, son rôle consiste à **développer et maintenir à leur meilleur niveau les références nationales** – méthodes et étalons – associées aux mesures physico-chimiques, des substances chimiques, des particules fines en passant par les macromolécules biologiques, et ce dans tous les milieux (solide, liquide et gaz). «Lorsque c'est possible, nous développons des méthodes traçables au SI, explique Sophie Vaslin-

Reimann qui a dirigé le pôle Métrologie Chimie et Biologie du LNE pendant ces 15 dernières années. Globalement, nous sommes dans une démarche de fiabilisation des mesures chimiques et biologiques.»

Répartie en quatre groupes d'application : Environnement et changement climatique, Gaz et aérosols, Analyses biologiques et Éthylométrie et addictions, l'équipe de métrologues est aux côtés de ses alter ego allemands et anglais respectivement de PTB et NPL, l'une des trois premières en Europe. «Notre particularité est de proposer une expertise dans un très grand nombre de domaines», précise Paola Fiscaro, qui prendra la relève, en 2023, à la tête de cette grande équipe multicarte. Pour ce faire, les métrologues mettent en œuvre des techniques de chimie analytique, au centre desquelles la spectrométrie de masse est déclinée sous différents couplages, selon les milieux et les espèces considérées. Mais également des techniques de spectrométrie infrarouge ou de mobilité électronique, en particulier pour les gaz et les aérosols. «À partir de là, nous développons des bancs de mesure de référence et des matériaux de référence (bouteilles contenant des mélanges gazeux, distributions en taille de nanoparticules,

matrices représentatives de l'eau de mer ou bien de milieux biologiques...) qui ressemblent par leur nature et leur composition aux échantillons réels», détaille la chimiste.

À ce titre, la métrologie chimique a ceci de particulier que son champ d'action est potentiellement sans limite. Or, «aucun laboratoire national ne peut couvrir la totalité des possibles en matière de molécules, de milieux ou de concentrations, note Sophie Vaslin-Reimann. Ainsi, à mon arrivée à la tête de l'équipe, sur la base de ses solides compétences en chimie analytique et en électrochimie dans différents milieux (gaz, eaux, biologie...), nous nous sommes orientés sur des problématiques à fort impact sociétal, telles que la surveillance de l'environnement et du changement climatique, le "Green Deal", ou encore les bio-analyses.»

Ainsi, l'expertise du LNE en mesures pour **l'environnement et le changement climatique** est aujourd'hui reconnue notamment pour les mesures d'acidité ou du pH, clés pour le suivi de l'acidification des océans, concomitante au dérèglement climatique. Au fil des années, le laboratoire a coordonné ou participé à plusieurs projets européens sur le sujet. Il est aussi le pilote de la thématique Observation de l'océan au sein du réseau européen de métrologie (EMN) «Climate and Ocean Observation». Et, comme exposé dans ce rapport, il coordonne la structuration de l'EMN POLMO «Pollution Monitoring». Enfin, il apporte son expertise aux 14 laboratoires du Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT). «Et concernant notre implication sur le suivi de nombreuses substances comme les perturbateurs endocriniens dans l'environnement, on peut par exemple citer la coordination du projet européen EDC-WFD, en cours de finalisation, pour le développement de méthodes de mesures d'hormones dans l'eau.», ajoute Béatrice Lalère, responsable de ce groupe thématique de recherche.

De son côté, le groupe spécialisé dans les mesures sur **les gaz et les aérosols** est incontournable pour tout ce qui concerne le suivi de la **pollution atmosphérique** pour les substances réglementées et depuis peu pour les polluants émergents (sulfure d'hydrogène, ammoniac). À ce titre, le LNE est notamment l'une des trois entités qui constituent le Laboratoire Central de la Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) et, au sein de ce dispositif, est le garant de la qualité des mesures effectuées par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) rapportées ensuite à l'Europe. Autre exemple de son implication sur des thématiques sociétales majeures : sa mobilisation pendant la pandémie de Covid-19 pour mettre en place un banc d'essai sur lequel ont ensuite été



EVALUATION DES PERFORMANCES DE MICRO-CAPTEURS POUR LA QUALITÉ DE L'AIR.

testées les performances de filtration de centaines de masques de protection respiratoire. «C'est une très bonne illustration de la manière dont les compétences développées dans un cadre de recherche peuvent être ensuite mobilisées pour répondre à un besoin urgent de la société», analyse Tatiana Macé, qui encadre ce groupe de métrologie des gaz. La réponse à de tels besoins est sans aucun doute la vocation du groupe de **recherche en bio-analyse** qui vient d'être plus formellement identifié l'année dernière à la faveur d'une réorganisation structurelle de l'équipe de métrologie chimique. Comme l'indique Vincent Delatour, responsable de ce nouveau groupe, «nous avons orientés nos travaux vers la fiabilisation des mesures effectuées pour des besoins médicaux qui jusqu'à récemment étaient très peu ou mal raccordées à des références métrologiques.» Ainsi, depuis le lancement de l'activité de biochimie au LNE, en 2008, le LNE a participé à plusieurs projets européens sur les maladies cardiovasculaires. La participation du LNE au projet CardioMet s'est en particulier soldée récemment par une publication dans la revue The Lancet.

À travers son implication dans plusieurs projets européens, le LNE s'est aussi impliqué dans des travaux sur les maladies neuro-dégénératives et les maladies infectieuses. Par exemple, Vincent Delatour coordonne actuellement un groupe de travail international sur le dosage de la procalcitonine, un biomarqueur permettant de discriminer infections bactériennes et infections virales. Le chercheur est également président de l'EMN TracelabMed sur la traçabilité des analyses médicales. Si chaque groupe d'activité met en œuvre des techniques et des compétences spécifiques, leur force réside également dans les possibles synergies qui peuvent naître de cette diversité. Par exemple, dans le cadre du LCSQA, mais également de projets européens comme AEROMET 2, les chimistes en métrologie des gaz collaborent avec ceux du groupe Environnement et changement climatique qui apportent leurs compétences pour le dosage des métaux, des hydrocarbures aromatiques (HAP) ou des pesticides. De même les spécialistes des mesures sur les gaz ont récemment prêté leur concours aux chercheurs en bio-analyse, pour le comptage de lipoprotéines par SMPS (scanning mobility particle sizer) dans le cadre d'un projet sur le dosage du cholestérol. Comme le résume Vincent Delatour, «la large palette de compétences rassemblées au sein de l'équipe de métrologie chimique du LNE nous permet de couvrir certains sujets sous des angles originaux.», au plus près des besoins de la société.



ICP-MS SPECTROMÉTRIE DE MASSE PLASMA.

COMPÉTITIVITÉ INDUSTRIELLE

GRANDES DISTANCES, NANOMONDE OU FORMES COMPLEXES, L'INDUSTRIE REQUIÈRE DES MOYENS POUR LES MESURER. DE MÊME, DE NOUVEAUX BESOINS MÉTROLOGIQUES QUI ONT TRAIT AUX TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES APPARAISSENT. SUR CES QUESTIONS, ET D'AUTRES, LE LNE ET LE RNMF ONT RÉPONDU PRÉSENTS POUR ACCOMPAGNER LES INDUSTRIELS DANS LE DÉPLOIEMENT DE TECHNOLOGIES INNOVANTES.

MÉTROLOGIE DES GRANDS VOLUMES, LE LABORATOIRE LNE-CNAM DÉPLOIE SES AILES

LE PROJET EUROPÉEN LaVA A DONNÉ L'OCCASION AU LABORATOIRE COMMUN LNE-CNAM D'ÉTOFFER SON OFFRE EN MATIÈRE DE MÉTROLOGIE DES GRANDS VOLUMES, RÉPONDANT ENTRE AUTRES À UN BESOIN DE L'INDUSTRIE AÉRONAUTIQUE.

L'industrie aéronautique a besoin de connaître avec exactitude la position d'éléments de grande taille ou de robots industriels, mais également de réaliser des mesures dimensionnelles sur des pièces à quelques centaines de micromètres près. Le projet européen LaVA, finalisé en 2022, visait à développer de nouveaux moyens pour ce type de mesures. Dans ce cadre, le laboratoire a proposé plusieurs méthodes et dispositifs originaux prêts à être adoptés dans l'industrie.

Ainsi, pour des mesures de position, les chercheurs ont développé une technique dite de multilatération qui permet de s'affranchir de mesures angulaires. Son principe : mesurer, de plusieurs endroits, la distance à une cible posée sur l'élément dont on souhaite connaître la position, afin d'en déduire les coordonnées. «Schématiquement, c'est le même principe que celui des systèmes de positionnement par satellites», explicite Joffray Guillory, ingénieur de recherche au Cnam.

Premier élément de ce dispositif : un télémètre laser dont la particularité est d'être fibré. Il peut ainsi facilement être connecté à plusieurs têtes de mesure – dans ce cas, quatre – sans être déplacé. «Traçable au mètre et caractérisé par interférométrie, il garantit des mesures jusqu'à 100 m avec une incertitude de 2 μ m», explique le scientifique.

En parallèle, les chercheurs ont réalisé deux types de cibles réfléchissantes. D'une part des réflecteurs disposés en coin de cube, d'autre part des sphères en verre de 14 mm de diamètre. «Les réflecteurs doivent pouvoir être orientés vers les différentes têtes de mesure et sont ainsi montés sur un cardan dont les axes ont été alignés de telle manière à garantir une incertitude de 5 μ m sur le positionnement, détaille Joffray Guillory. Quant aux sphères, du fait d'une importante perte de signal lors de la réflexion, elles ne sont efficaces que jusqu'à 20 m, mais n'ont pas besoin d'être orientées et sont adaptées à des situations nécessitant un dispositif léger.»

Enfin, afin de déterminer la vitesse de la lumière sur le trajet aller-retour entre les têtes et la cible, qui dépend crucialement de la température de l'air, les métrologues ont mis au point un thermomètre acoustique. Fondé sur la mesure de la vitesse du son sur le chemin parcouru par la lumière, il permet de déterminer la température moyenne de l'air sur ce même trajet de mesure.

Après prise en compte de toutes les sources d'erreur, l'incertitude de mesure avec ce nouveau dispositif a été évaluée entre



Trois questions à...

JOFFRAY GUILLORY ET HICHEM NOUIRA

Comment le LNE-CNAM se positionnait-il sur les différentes techniques mises en œuvre dans LaVA avant la réalisation du projet ?

J.G. et H.N. : Le LNE-CNAM effectue des étalonnages primaires de sources lasers par battements de fréquences. Et nous sommes spécialistes des mesures de distance de plusieurs kilomètres et en réfractométrie. Nous avons également une maîtrise de la métrologie dimensionnelle. En revanche, nous n'avions pas de compétence particulière sur la mesure de position, ni en vision.

LaVA a donc été l'occasion d'acquérir ces nouvelles compétences ?

J.G. et H.N. : En effet. Pour les mesures de position, nous nous sommes fondés sur notre expertise en télémétrie laser, acquise lors de précédents projets à finalité de géodésie. En revanche, pour la vision, nous sommes partis de zéro et avons dû tout apprendre et tout développer.

Quel intérêt ces compétences ont-elles au-delà de LaVA ?

J.G. et H.N. : La technique de télémétrie laser utilisée dans LaVa a par exemple été utilisée dans le cadre du projet GeoMetre pour déterminer les coordonnées du centre de rotation du radiotélescope de l'Observatoire de Wettzell, et ainsi améliorer le raccordement entre les différentes techniques de géodésie spatiale mises en œuvre par cet observatoire. Quant au système de vision par stéréo, il intéresse potentiellement tous les industriels confrontés à la mesure de pièces de grand volume. LaVa a par ailleurs été l'occasion d'amorcer le développement d'une technique de «matching».



CAPTEUR DE MESURE POSITIONNÉ SUR LE BRAS ROBOTISÉ ET COMPOSÉ D'UN PROJECTEUR DE MOTIF SUR LA SURFACE ET DE 2 CAMÉRAS ANALYSANT L'IMAGE DE LA PROJECTION.

10 et 20 μm pour une distance jusqu'à 10 m. «C'est deux fois mieux qu'avec le dispositif du commerce auquel notre système a été comparé dans le cadre du projet», précise le physicien.

Le second volet de la participation du LNE-CNAM au projet LaVA porte sur le développement d'un instrument de mesure traçable au SI fondé sur la stéréovision, pour caractériser les surfaces de pièces de grande taille. Son principe ? Un canevas numérique présentant différents motifs est projeté sur la pièce à mesurer, avant d'acquies des images avec deux caméras, à partir desquelles un traitement d'images et une analyse des données permettent de déterminer les caractéristiques dimensionnelles de la surface de la pièce. Comme le mentionne Hichem Nouira, «notre objectif était de nous approprier cette technique afin d'en proposer une version caractérisée et traçable au SI.»

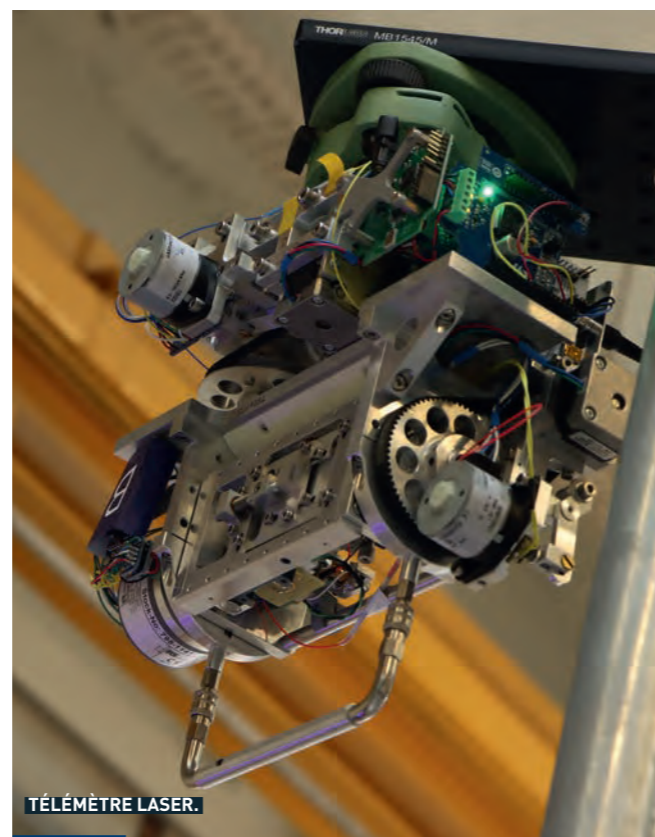
Pour ce faire, les métrologues ont réalisé un important travail d'étalonnage et d'optimisation des positions et des orientations des différents éléments du système de mesure à l'aide d'un algorithme d'intelligence artificielle. «Nous avons également effectué des mesures avec l'instrumentation développée par l'équipe de Joffray Guillory, le tout permettant d'affirmer que nos mesures sont cohérentes», explique Hichem Nouira. À cette fin, ils ont notamment utilisé un damier en céramique tracé, de quoi prendre en compte les distorsions et autres aberrations optiques à même de biaiser les enregistrements. Et pour que chaque pixel puisse être traduit en résultat de mesure dimensionnelle, les chercheurs ont traité l'ensemble de leurs données par un modèle approprié.

CHIFFRES CLÉS

LaVA a conduit à la publication de 4 articles dans des revues à comité de lecture. Et 3 autres articles sont en cours de soumission.

Enfin, les scientifiques ont utilisé leur nouvelle installation pour évaluer un étalon représentatif d'une pièce aéronautique caractérisée à l'aide d'une machine à mesurer en 3D.

LaVA terminé, les équipes vont désormais poursuivre le développement d'outils numériques d'acquisition et de traitement de données, notamment dans le cadre du nouveau projet européen DynaMITE, dont l'objectif est de mesurer la position de cibles en mouvement.



TÉLÉMÈTRE LASER.

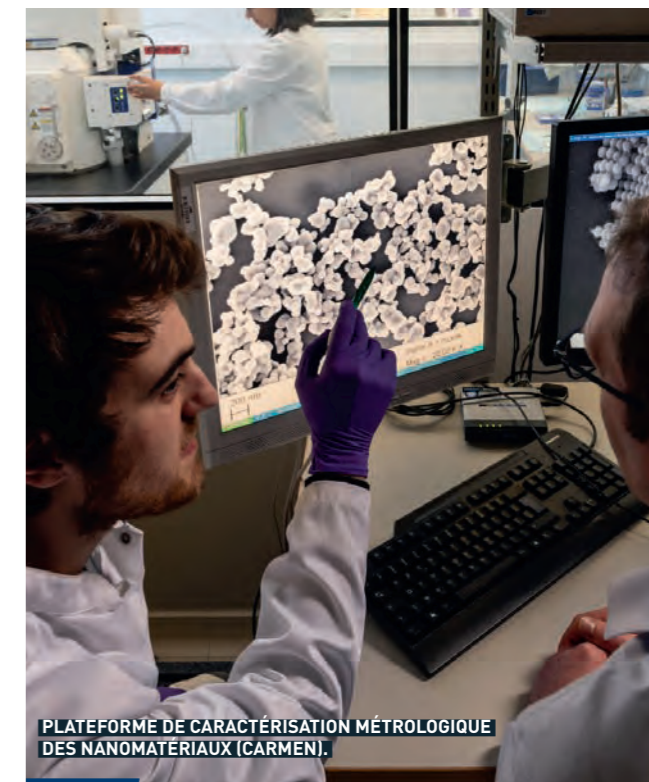
CARMEN III : LA COMPLEXITÉ DU NANO-MONDE À PORTÉE DE MESURE

Santé, cosmétiques, électronique... l'industrie a d'importants besoins de caractérisation à l'échelle nanométrique. C'est la vocation de la plateforme CARMEN du LNE qui offre la possibilité de mesures structurales, physiques et chimiques sur des nano-objets. Mené depuis 2021, le projet CARMEN III vise à étendre l'offre de la plateforme à des nanoparticules de forme complexe et à développer une métrologie multi-grandeurs des nanodispositifs.

Ainsi, depuis début 2022, l'approche hybride AFM-MEB, qui permet de mesurer les dimensions d'une nanoparticule, est accessible aux industriels pour la mesure de particules de forme quelconque. «Validée sur des particules de dioxyde de titane de forme bipyramidale, elle permet de déterminer la taille et l'orientation d'une nanoparticule», précise Loïc Cruzier, chef du projet au LNE.

Par ailleurs, l'année passée, les chercheurs se sont employés à adapter un outil de positionnement d'un nano-objet sur plusieurs instruments de caractérisation de la plateforme CARMEN. Permettant de localiser un nano-objet précisément par un système de balise, il permettra, en complément des substrats gravés, de réaliser des mesures de microscopie corrélative sur la même nanoparticule. De quoi établir sa carte d'identité complète avec des données structurales, dimensionnelles, chimiques, thermiques ou encore électriques.

Enfin, les développements se poursuivent pour permettre d'ajouter à CARMEN une possibilité de mesure de propriétés mécaniques de nano-objets.



PLATEFORME DE CARACTÉRISATION MÉTROLOGIQUE DES NANOMATÉRIAUX (CARMEN).

CONTRÔLE QUALITÉ : LA SPECTROSCOPIE PAR RÉSONANCE ULTRASONORE AU SERVICE DE LA FABRICATION ADDITIVE

La tomographie X demeure la méthode de référence pour détecter d'éventuels défauts dans une pièce mécanique manufacturée par fabrication additive (FA). Coûteuse et complexe à mettre en œuvre, elle n'est néanmoins pas toujours adaptée aux besoins des industriels. Pour des tests préliminaires, la spectroscopie par résonance ultrasonore (RUS) est prometteuse. D'où les développements réalisés au LNE en 2022 visant à donner à cette méthode une qualification métrologique.

Précisément, la RUS consiste à soumettre une pièce à un choc mécanique avant d'enregistrer sa réponse acoustique par rapport à celle de pièces de référence. L'année passée, le LNE a conduit un projet en collaboration avec l'entreprise Safran sur la plateforme AFH (Additive Factory Hub), à Saclay, afin d'étudier en détail le potentiel de la RUS pour tester des pièces mécaniques de l'industriel. Comme le précise Anne-Françoise Obaton, «il s'agissait notamment d'évaluer les limites de détection de la méthode.»

Au-delà, dans le cadre d'un autre projet débuté en 2022, les scientifiques ont utilisé des pièces de Safran dans le but de préciser les facteurs qui influencent les résultats de la spectroscopie. Objectif à terme : proposer des mesurandes

permettant de faire le lien entre le décalage des spectres et les défauts sous-jacents.

En parallèle, les métrologues ont montré qu'il était possible de corréler un signal RUS aux paramètres de fabrication (puissance du laser, vitesse de balayage...) d'une pièce fabriquée en FA. Un résultat potentiellement intéressant pour le contrôle de procédés industriels.

«IL S'AGISSAIT NOTAMMENT D'ÉVALUER LES LIMITES DE DÉTECTION DE LA MÉTHODE RUS.»

ANNE-FRANÇOISE OBATON,
CHERCHEUSE AU LNE

MESURE DE VOLUMES COMPLEXES : LE LNE RÉDUIT LES INCERTITUDES



MONTAGE DÉMONSTRATEUR DU PYCNOMÈTRE À GAZ.

Un pycnomètre à gaz permet de mesurer le volume, typiquement de l'ordre de 10 cm^3 , d'objets complexes, tels ceux obtenus par fabrication additive. Le principe de cet instrument repose sur la détente statique d'un gaz dans une cavité accueillant la pièce à mesurer. Le LNE a proposé une nouvelle méthode d'utilisation d'un pycnomètre pour élargir et améliorer les performances des mesures. Validée sur un démonstrateur, la méthode permet des mesures de meilleure qualité.

Plus précisément, le gaz se trouve initialement dans la cavité qui contient l'objet à mesurer, avant sa détente vers une autre enceinte. Le volume inconnu est déterminé par mesure des pressions avant et après la détente, ce qui nécessite que soient connus les volumes des deux enceintes.

Pour améliorer le principe de mesure, les métrologues ont ajouté un dispositif permettant de générer des débits stables du gaz entre les deux enceintes. On peut alors déterminer le volume de l'objet en mesurant le taux de variation de pression dans l'une et l'autre enceinte, qui correspond à un rapport de vitesse de remplissage. Ce faisant, la mesure ne dépend plus des volumes des deux cavités.

«En principe, cette façon de procéder est plus satisfaisante», analyse Frédéric Boineau qui en a eu l'idée. Et, avec des incertitudes jusqu'à deux fois plus faibles, la méthode de mesure s'est effectivement révélée être plus performante une fois mise en œuvre sur le prototype de pycnomètre développé par le chercheur dans le cadre d'un projet de métrologie finalisé l'année dernière. La nouvelle méthode, dont le brevet a été publié en 2022, pourra être mise à profit par des constructeurs pour améliorer les performances de leurs appareils.

SOURCE DE NEUTRONS : UN NOUVEAU MOYEN D'ÉTALONNAGE POUR LES FAIBLES DÉBITS D'ÉMISSION

De la prospection géologique au démarrage des réacteurs nucléaires en passant par le contrôle non destructif et l'irradiation de matériaux, de nombreuses applications utilisent des sources de neutrons à base de radionucléides. Au LNE-LNHB, les moyens en vigueur permettaient l'étalonnage de telles sources pour des débits d'émission compris entre 10^5 à 10^9 s^{-1} . Un projet finalisé en 2022 permettra d'étendre ces capacités d'étalonnage vers les plus faibles émissions neutroniques.

En complément de l'installation de référence utilisant un bain de manganèse, les métrologues ont ainsi mis au point un nouveau dispositif baptisé AQUASPEC. Doté de douze canaux d'instrumentation équipés de scintillateurs plastiques dopés au ^6Li , il permettra d'accéder à des mesures de débits d'émission 100 fois plus faibles qu'avec les moyens actuels. Par ailleurs, ces détecteurs sont sensibles aux neutrons dits thermiques, mais également aux neutrons dits rapides. D'où la possibilité d'exploiter un grand nombre de données expérimentales et de remonter au spectre d'émission sans introduire d'*a priori* sur sa forme lors de la reconstruction.

Le laboratoire travaille encore à la validation et l'étalonnage de la nouvelle installation, de même qu'à la finalisation de l'algorithme de reconstruction des spectres. Comme l'indique Cheick Thiam, chercheur au LNE-LNHB, «nous visons une incertitude comprise entre 1 et 3 % sur l'étalonnage des débits d'émission.» En attendant, un brevet sur l'installation et la méthode a été déposé, et le laboratoire disposera bientôt d'une solution unique au monde pour l'étalonnage des sources de neutrons à base de radionucléides.

«NOUS VISIONS UNE INCERTITUDE COMPRISE ENTRE 1 ET 3 % SUR L'ÉTALONNAGE DES DÉBITS D'ÉMISSION.»

CHEICK THIAM, CHERCHEUR AU LNE-LNHB

LA TRAÇABILITÉ AU SI DES MESURES ÉLECTRIQUES À HAUTE FRÉQUENCE UP-DATÉES

De nombreuses applications émergentes des technologies de la communication et de l'électronique : 5G, Internet des objets, véhicules autonomes... nécessitent de larges bandes passantes et utilisent par conséquent des ondes à des fréquences très élevées, typiquement de quelques 10 GHz à 1 THz. Pour répondre aux besoins des industriels du secteur, il est donc essentiel d'augmenter la traçabilité au SI des mesures électriques dans ce domaine du spectre électromagnétique. C'était l'objectif du projet européen TEMMT, auquel le LNE a participé, et qui s'est achevé l'année dernière. En particulier, les métrologues français ont développé un nouveau banc pour l'étalonnage des sondes de puissance dans la bande comprise entre 110 GHz et 170 GHz. Fondé sur un microcalorimètre, le nouveau dispositif a été validé par une comparaison avec les bancs d'autres laboratoires nationaux partenaires du projet. Résultat : la nouvelle installation affiche

une incertitude de mesure comprise entre 1,5 et 5,6 %, comparable à celles des autres.

En parallèle, le laboratoire a étoffé ses capacités de mesure permettant d'assurer la traçabilité des mesures de paramètres S, grandeurs caractérisant le comportement d'un dispositif électrique auquel on applique des signaux électriques de très haute fréquence. «Et son comportement dépend de son type de connexion, précise Djamel Allal, responsable du projet au LNE. Nous avons ainsi étendu nos moyens de mesure à la ligne coaxiale de 1,35 mm jusqu'à 90 GHz, bande correspondant notamment aux fréquences utilisées dans les radars automobiles.»

Enfin, les paramètres S de microcircuits électriques, déterminés par des mesures sous pointes, pourront désormais être raccordés au SI jusqu'à 170 GHz contre 110 GHz auparavant.



EXEMPLE D'UN MONTAGE SUR LE BANC D'ESSAI SBI.

UN MODÈLE HYBRIDE POUR PRÉDIRE LE COMPORTEMENT AU FEU DE PROFILÉS EN BOIS COMPOSITE

La section, l'espacement ou l'orientation de lames de profilés en bois composite influent grandement le comportement au feu de leurs assemblages en claire-voie utilisés comme produits de construction. Dans le cadre d'un partenariat avec l'industriel Geolam AG, le LNE a développé une méthodologie permettant d'optimiser le plan d'expérience des essais normatifs mis en œuvre pour le classement de ces produits (Euroclasse).

Pour ce faire, le laboratoire a réalisé une série d'essais sur différentes configurations à échelle réduite des profilés. Les résultats obtenus ont ensuite été corrélés à ceux d'une simulation numérique expliquant la dynamique de la flamme selon les configurations, d'où il a été possible de déduire une loi de comportement au feu en fonction des paramètres représentatifs de chaque configuration.

À la clé, la possibilité de ne réaliser que quelques essais (contre plus d'une vingtaine auparavant) pour établir le classement de chaque configuration. Une poignée d'essais supplémentaires réalisés en aval permettent de déterminer et de s'assurer des limites du domaine d'application.

«À la fin, nous serons en mesure de livrer au client un rapport de classement pour une large gamme de ses produits», explique Bénédicte Heuzé, experte en sécurité incendie au LNE. Au-delà, le laboratoire s'est enrichi d'un savoir-faire dans un domaine encore très peu pris en compte par les bureaux de contrôle. Plusieurs publications scientifiques seront prochainement soumises. La méthodologie développée pourrait être par ailleurs appliquée à d'autres systèmes constructifs ou d'autres matériaux.

LA PAROLE À... CAROLE BERRARD,

RESPONSABLE DES ENJEUX SANITAIRES ASSOCIÉS AU RECYCLAGE DANS L'ÉQUIPE ÉCOCONCEPTION DE CITEO.

DANS LE CADRE DU PROJET « ABA MODELING », FINALISÉ EN 2022, L'ENTREPRISE CITEO, FINANÇÉE PAR LES ENTREPRISES POUR RÉDUIRE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE LEURS EMBALLAGES MÉNAGERS ET PAPIERS EN FRANCE, ET LE LNE, AINSI QUE TROIS AUTRES PARTENAIRES, ONT ÉVALUÉ LA COMPATIBILITÉ DES BARQUETTES ABA TRI-COUCHE EN POLYÉTHYLÈNE TÉRÉPHTALATE POUR DES APPLICATIONS ALIMENTAIRES.



Quel était l'objectif du projet ABA ?

Carole BERRARD : L'étude s'est intéressée aux barquettes ABA, où du rPET non décontaminé est utilisé dans la couche intermédiaire "B". Ce type de structure pouvait être conforme au droit européen jusqu'en 2022, date à laquelle la Commission européenne a renforcé la réglementation en demandant un avis de l'EFSA sur les structures ABA utilisées pour des usages alimentaires. Le rPET évalué dans cette étude est produit avec un procédé de recyclage mécanique qui n'a pas d'avis EFSA.

Pourquoi ?

C.B. : La couche B est entourée de 2 couches "A" en plastique vierge devant faire office de barrières fonctionnelles. Elles limitent la migration des potentiels contaminants de la couche B vers l'aliment. Or les procédés de fabrication industriels des barquettes peuvent impacter les couches barrières et accélérer la migration vers l'aliment.

Comment avez-vous procédé ?

C.B. : Le cœur du projet était fondé sur la modélisation numérique de la migration de molécules du rPET vers l'aliment. Nous nous sommes appuyés sur les challenges tests demandés par l'EFSA dans le cas de l'évaluation du rPET et avons considéré dix molécules de différents poids moléculaires et présentant différentes affinités avec les aliments. Rien ne dit que ces molécules sont présentes en réalité, on cherchait à comprendre le phénomène. Le projet a aussi été complété par des analyses expérimentales de la qualité de gisements de PET recyclé non décontaminé et des phénomènes de diffusion du PET. Les modélisations intègrent différents aliments (ex. charcuterie, produits laitiers...) et les conditions de production des barquettes : géométries, épaisseurs, temps, températures.

Quel a été l'apport du LNE ?

C.B. : Nous avons réuni un consortium regroupant le Centre technique agroalimentaire (CTCPA), le Centre technique industriel de la plasturgie et des composites (IPC), l'INRAe et le LNE. Celui-ci a d'une part assuré le pilotage de l'ensemble du projet, et d'autre part, conjointement avec l'INRAe, porté l'expertise en matière de modélisation des cinétiques de migration. J'ajouterais que, outre ses compétences, l'aptitude à coordonner des projets transverses d'envergure de Phuong-Mai Nguyen, la pilote du projet, a été déterminant pour la bonne réussite du projet.

Quels sont les résultats principaux pour l'emploi des barquettes ABA ?

C.B. : L'étape de coextrusion du film ABA étant très impactante, l'aptitude au contact alimentaire de telles barquettes ABA n'est pas garantie. Le projet s'étant inscrit dans le contexte d'un essor de la réglementation, nous soutenons la décision de la Commission européenne d'intégrer ces structures dans la réglementation sur les plastiques recyclés en les soumettant à un avis de l'EFSA.

L'autre interrogation porte sur l'impact de la couche B dans un schéma d'économie circulaire : c'est un sujet que Citeo va continuer de suivre avec les recycleurs pour pérenniser le recyclage des pots et barquettes en nouveaux emballages.

TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE NÉCESSITE DE POUVOIR SURVEILLER L'ENVIRONNEMENT À COURT TERME (POLLUTION) COMME À LONG TERME (CLIMAT), ET AUSSI D'ACCOMPAGNER LES INDUSTRIELS PORTEURS DE SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES. SUR TOUS CES POINTS, LE LNE ET LE RNMF ACCOMPAGNENT L'ENSEMBLE DES ACTEURS QUI PARTICIPE À L'ESSOR D'UN MONDE DURABLE.

LA DÉBITMÉTRIE DES GAZ RENOUVELABLES EN VOIE DE NORMALISATION

L'ESSOR DES GAZ RENOUVELABLES IMPOSE DE REVOIR LES NORMES DE CONCEPTION ET DE CERTIFICATION DES COMPTEURS À GAZ. COORDONNÉ PAR LE LNE ET AVEC LA PARTICIPATION DU LNE-LADG, LE PROJET EUROPÉEN NEWGASMET A PERMIS DE COLLECTER LES INFORMATIONS POUR ADAPTER LES MOYENS D'ÉTALONNAGE DES INSTRUMENTS DE MESURE, ET D'APPORTER DE NOUVEAUX RÉSULTATS D'ESSAIS NÉCESSAIRES À LA MODIFICATION DES NORMES TECHNIQUES.

Outre son activité de métrologie fondamentale, le LNE a également un rôle primordial dans le domaine de la certification et de la métrologie légale. À ce titre, le laboratoire évalue la conformité d'instruments de mesure avec la réglementation, en particulier la directive européenne 2014/32/UE sur les instruments de mesure, dite directive MID. C'est notamment le cas des compteurs de gaz pour lesquels l'évaluation de la conformité inclut des essais d'exactitude, mais également des essais de durabilité et de perturbation qui dépendent du type de compteur considéré.

Actuellement, ces dispositifs sont utilisés pour la mesure de débits de gaz naturel. Or, le gaz de ville inclut une fraction d'hydrogène, susceptible d'augmenter dans les années à venir du fait de la montée en puissance des énergies renouvelables. La production d'hydrogène est en effet une manière avantageuse de «stocker» dans le réseau gazier les énergies solaires ou éoliennes, intermittentes par nature. Dans le même temps, d'autres gaz, comme le biométhane, sont également produits à partir de déchets industriels ou agricoles, ou encore de boues de stations d'épuration.

Transportés par le réseau gazier existant, tous ces nouveaux gaz dits renouvelables, diffèrent du gaz naturel par leurs propriétés physicochimiques ou leur teneur en impuretés ; cela peut avoir un impact sur le fonctionnement et les performances métrologiques des compteurs de gaz. Par conséquent, il est nécessaire d'envisager une révision des normes techniques les concernant. Dans ce but, le projet européen NEWGASMET a rassemblé, entre 2019 et 2022, sept laboratoires nationaux de métrologie européens et des acteurs industriels majeurs (quatre fabricants de compteurs et deux opérateurs gaziers). Coordonné par le LNE, et avec la participation du LNE-LADG en tant que laboratoire français en charge des références nationales de débitmétrie des gaz, le projet a permis de rassembler toutes les informations nécessaires à la mise à jour des normes sur le sujet.

Dans un premier temps, les partenaires ont procédé à un important travail bibliographique permettant pour la première fois d'identifier l'ensemble des problèmes à traiter. «Par exemple, ayant une masse et une taille moléculaire moindre que celles du méthane, l'hydrogène peut être plus aisément l'objet de fuites qui, outre la question de sécurité, peuvent fausser le comptage», relate Christophe Brun, ingénieur en certification au LNE. Autre difficulté : les biogaz sont plus corrosifs, ce qui pourrait nécessiter de modifier les exigences réglementaires sur la durabilité des compteurs.



Trois questions à...

CHRISTOPHE BRUN,
INGÉNIEUR EN CERTIFICATION AU LNE

Le projet européen NEWGASMET se situe à la jonction entre métrologie fondamentale et normalisation. Cela en fait un projet original ?

C.B. : En effet, conduit entre 2019 et 2022, c'est un des premiers projets européens du programme EMPIR qui s'inscrit dans la volonté de rapprocher les projets EURAMET des besoins normatifs et réglementaires des industriels, qui remontent parfois par les demandes de certification et d'évaluation de la conformité.

Comment le projet s'est-il ainsi mis en place ?

C.B. : Au sein de WELMEC, une instance de coopération entre les services de métrologie légale des États membres de l'Union européenne (UE), nous avons identifié cette problématique de certification des compteurs de gaz dans un contexte d'émergence des gaz renouvelables. En parallèle, la direction de la Recherche du LNE m'a informé de la possibilité d'obtenir un soutien financier de l'UE par la participation à un projet de recherche prénormative d'EMPIR à finalité de réglementation européenne. Les discussions avec nos différents partenaires ont ensuite confirmé le bien-fondé d'un tel projet collaboratif, il a été accepté, et je m'en suis retrouvé le coordinateur.

Qu'est-ce que NEWGASMET vous a apporté ?

C.B. : Outre son intérêt propre, ce projet m'a permis d'acquérir une meilleure vision du contexte européen industriel et réglementaire sur le comptage de gaz. Il a également permis de resserrer les liens entre métrologie fondamentale et métrologie légale dans le domaine de la débitmétrie gazeuse. Sans lui, certains projets que nous menons maintenant avec le LNE-LADG, sur la certification de stations à hydrogène ou sur de nouveaux compteurs pour le biogaz, n'auraient peut-être pas vu le jour aussi facilement.

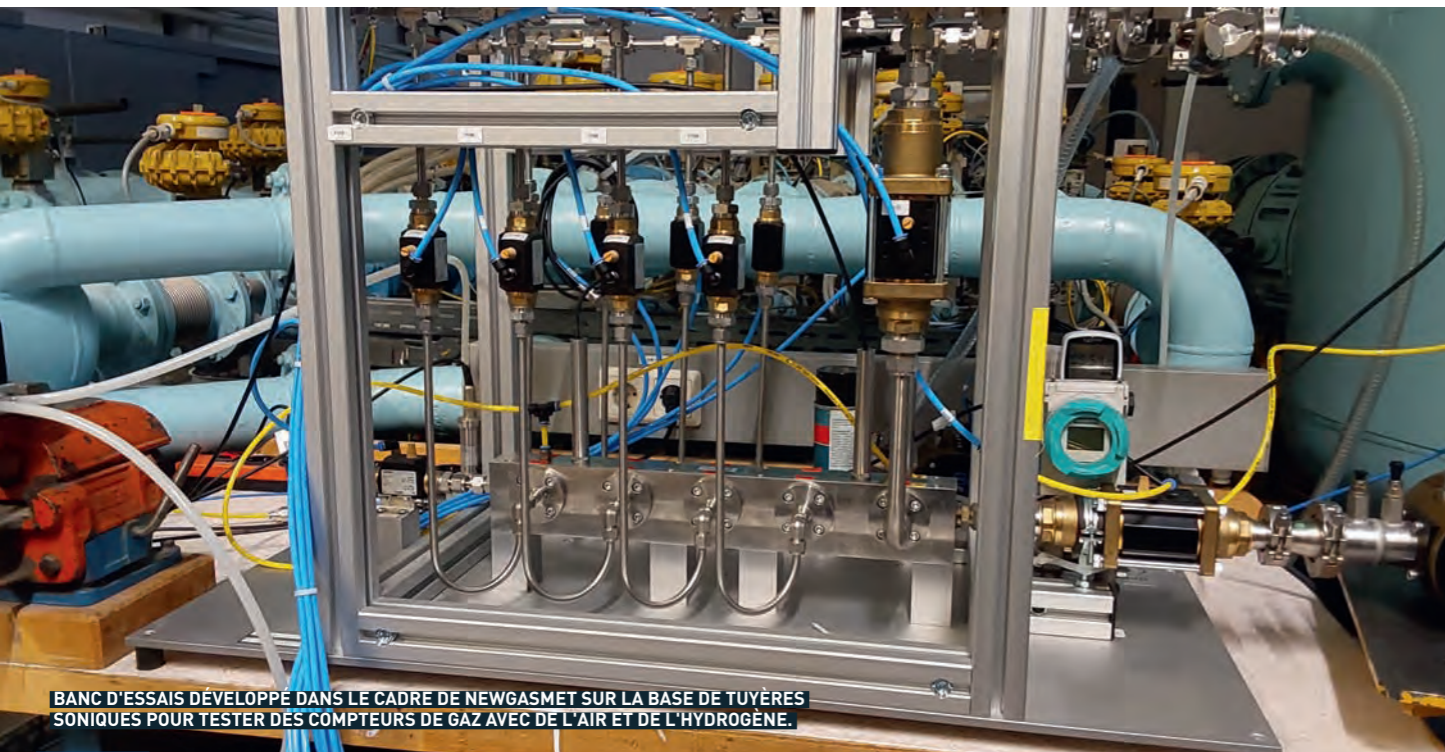
Afin de préciser la meilleure façon de modifier les normes en vigueur, les partenaires ont réalisé une série d'essais d'exactitude et de durabilité des compteurs, avec du biogaz et de l'hydrogène ; malgré les difficultés d'organiser ces essais à l'échelle européenne en pleine crise sanitaire du Covid, ils ont pu être menés à leur terme. « Ces premiers résultats définissent un point de départ pour hiérarchiser les sujets techniques à prendre en compte », explique le spécialiste.

En parallèle de cet aspect normatif, NEWGASMET a également permis d'aborder des aspects plus spécifiquement métrologiques. L'impact des gaz renouvelables sur la conception des bancs d'essai et des méthodes d'étalonnage des compteurs a été étudié ; dans le même temps, un banc d'étalonnage a été construit et une comparaison européenne a été menée.

Dans cette perspective, le LNE-LADG a eu un rôle actif dans l'analyse bibliographique des travaux de métrologie des gaz renouvelables, utilisés seuls ou en mélange avec le gaz

naturel. L'équipe autour de Rémy Maury a également participé à la définition des compositions et des gammes typiques de nouveaux gaz à utiliser pour les essais de caractérisation et les étalonnages de capteurs. Enfin, elle a évalué l'incertitude d'un étalonnage réalisé sur un banc de référence par tuyères soniques.

À l'issue du projet, l'ensemble des laboratoires nationaux participants disposent donc de méthodes et de moyens de caractérisation et d'étalonnage plus adaptés pour les nouveaux usages avec des gaz renouvelables. Côté normalisation et certification, une série de préconisations ont été produites et transmises aux organismes réglementaires. « NEWGASMET a rassemblé l'ensemble des acteurs impliqués dans la débitmétrie des gaz, analyse Christophe Brun. Ces résultats orienteront donc positivement le travail des groupes de normalisation qui traitent des différents types de compteurs de gaz. » Ce qui accompagnera l'essor en Europe des gaz renouvelables.



BANC D'ESSAIS DÉVELOPPÉ DANS LE CADRE DE NEWGASMET SUR LA BASE DE TUYÈRES SONIQUES POUR TESTER DES COMPTEURS DE GAZ AVEC DE L'AIR ET DE L'HYDROGÈNE.

CHIFFRES CLÉS

NEWGASMET a réuni 15 partenaires, dont 7 laboratoires nationaux de métrologie, 2 instituts de recherche, 2 opérateurs gaziers nationaux et 4 fabricants de compteurs à gaz. À la clé, 7 livrables et création d'un réseau de 50 parties prenantes directement intéressées par les résultats.

«NEWGASMET A RASSEMBLÉ L'ENSEMBLE DES ACTEURS IMPLIQUÉS DANS LA DÉBITMÉTRIE DES GAZ.»

CHRISTOPHE BRUN,
INGÉNIEUR EN CERTIFICATION AU LNE



SONDE MULTIPARAMÈTRES PERMETTANT D'ÉVALUER LES PIGMENTS DE CHLOROPHYLLE, LES CIANOBACTÉRIES ET LA TURBIDITÉ.

LE RÉSEAU EUROPÉEN DE MÉTROLOGIE POLMO OFFICIAISÉ

En mai dernier, l'Assemblée Générale d'EURAMET a officialisé l'acte de naissance d'un nouveau réseau européen de métrologie (EMN), POLMO, portant sur la surveillance de la pollution. Regroupant une vingtaine de laboratoires nationaux de métrologie européens, il permettra de répondre de manière coordonnée aux problématiques métrologiques associées à la surveillance de tous les milieux, eau, air et sol, et ce avec une approche pluridisciplinaire et multipolluant. Afin de répondre au plus juste, POLMO vient de mettre en ligne un questionnaire destiné à l'ensemble des acteurs concernés par la surveillance de la pollution de l'environnement : laboratoires d'analyses, agences environnementales, industriels... L'analyse des réponses, qui vise à identifier les besoins métrologiques, programmée pour cette année, permettra ensuite de proposer un agenda stratégique, vraisemblablement courant

2024. « En très forte interaction avec les parties prenantes, il s'agira ainsi d'optimiser les savoir-faire et compétences des différents laboratoires nationaux pour répondre à des problématiques concrètes », précise Paola Fiscaro, chimiste au LNE, qui a coordonné le projet de mise sur pieds du réseau. En outre, POLMO pourra être un « guichet unique » de référence pour les utilisateurs finaux, quels que soient leurs besoins : matériaux et méthodes de référence, guides de bonnes pratiques... De quoi faire de la surveillance au plus juste de la pollution de l'environnement, une des conditions permettant d'atteindre l'objectif de l'Union européenne de vivre, d'ici 2050, dans les limites écologiques de la planète. De plus, l'amélioration des performances des moteurs grâce à la maîtrise des mesures de pression dynamique ne pourra qu'avoir un impact significatif sur l'environnement.

FORTS COURANTS À HAUTE FRÉQUENCE : INCERTITUDE DE MESURE RÉDUITE D'UN FACTEUR 10

Différentes industries, comme l'industrie automobile, ont besoin de mesurer des courants électriques à très haute fréquence (typiquement 1 MHz) et à des intensités jusqu'à 10 A, notamment pour mesurer l'énergie électrique consommée. Jusqu'à il y a peu, les possibilités d'étalonnage des dispositifs de mesure dans cette gamme de courant étaient limitées. Les nouveaux moyens de mesure développés par le LNE pour ce faire sont désormais opérationnels et qualifiés. Ceux-ci prennent la forme d'un « shunt » étalon, soit un dispositif permettant, à partir de son impédance, très faible et déterminée avec une très bonne exactitude, et de la mesure de la tension à ses bornes, de calculer les caractéristiques du courant qui le traverse. Grâce à la géométrie particulière du « shunt » qui a permis d'en établir un modèle analytique robuste, et une nouvelle méthode de caractérisation à haute fréquence, les

métrologues ont pu valider les performances métrologiques de leur nouvelle installation. Résultat : notamment mis en œuvre pour étalonner des tores de courant utilisés dans l'industrie pour mesurer des impulsions de courant, le nouveau shunt permet de ramener les incertitudes d'étalonnage à 0,2 %, contre dix fois plus avec les moyens disponibles jusqu'alors. Mieux, « avant, pour les fréquences de 20 kHz à 1 MHz, cette incertitude de 2 % n'était garantie que pour quatre fréquences de mesure, précise Mohamed Ouameur, chef du projet de développement de ce shunt. Grâce au modèle analytique du dispositif, l'incertitude de 0,2 % est désormais accessible sur toute la gamme comprise entre 100 Hz et 1 MHz. » Les procédures d'étalonnage finalisées, le nouveau banc est quasiment prêt à entrer en action.



ÉTALON NATIONAL DE MESURE DES IMPULSIONS NANOSECONDES DE HAUTE TENSION (EHT).

LES HAUTES PUISSANCES ÉLECTRIQUES PULSÉES, ULTRA BRÈVES, ONT DÉSORMAIS LEUR ÉTALON

Issues du secteur militaire, les impulsions très courtes à haute tension trouvent désormais des applications dans le domaine médical (imagerie, traitement anticancéreux...), pour la pasteurisation ou encore la recherche fondamentale. Sauf qu'il n'existait aucune infrastructure, ni en France ni en Europe, pour étalonner les dispositifs capables de générer de telles impulsions. Un projet finalisé en 2022 permet désormais au LNE d'assurer la traçabilité au SI des mesures d'impulsions nanosecondes et sub-nanosecondes, jusqu'à 500 kV. Objet de la thèse de doctorat de Mohammad Saif Khan, le développement d'un diviseur de tension de type capacitif est au cœur du système de mesure mis en place par les métrologues du LNE. Comme l'explique Mohamed Agazar, chef du projet, «partant d'une page blanche, nos réflexions ont porté sur le choix des matériaux et de leur assemblage, avec une problématique particulière à résoudre pour déposer une couche

isolante d'épaisseur micrométrique.» Afin d'absorber l'énergie des impulsions, les ingénieurs ont également conçu une résistance de charge de 50 Ω capable de supporter des pics d'intensité de 10 kA pendant une dizaine de nanosecondes et avec une composition spectrale jusqu'à 3 GHz. En l'absence de toute référence, les chercheurs ont caractérisé le diviseur par des méthodes classiques à basse tension, puis à haute tension par extrapolation à l'aide d'un modèle théorique. Facilement insérable dans un dispositif d'étalonnage d'impulsions de tension, le nouveau diviseur a été testé avec succès jusqu'à 300 kV en mono-polaire et jusqu'à 420 kV en bipolaire. Sa bande passante est comprise entre 300 kHz et 2 GHz et il permet de caractériser des impulsions de tension avec une incertitude de mesure de 3 % pour la tension crête et de 100 ps pour le temps de montée.

LE SUIVI DE L'ENVIRONNEMENT ACCÈDE À LA PRÉCISION QUANTIQUE

Le suivi de certains des paramètres critiques de l'évolution du climat et de l'environnement, tels que le niveau des mers ou le recul des glaciers, nécessite l'établissement d'un système de référence géodésique à la précision millimétrique. Dans cette entreprise, le LNE-SYRTE est leader avec son gravimètre atomique (CAG) qui définit la référence nationale et détient le record mondial d'exactitude. Plusieurs actions réalisées l'année passée l'illustrent. Ainsi, les physiciens ont poursuivi leur collaboration avec l'industriel Exail qui commercialise des gravimètres quantiques fondés sur des technologies développées au laboratoire. Précisément, ils ont mené conjointement une action de caractérisation des performances d'un nouvel instrument compact (DQG) capable

de mesurer simultanément l'attraction de la pesanteur, g , et son gradient vertical. «Pouvoir mesurer ces deux paramètres ensemble permet de lever certaines indéterminations qui limitent la précision des références», explique Sébastien Merlet, en charge des références gravimétriques au LNE-SYRTE. Par ailleurs, le laboratoire a coordonné, sur son site du LNE à Trappes, une comparaison de gravimètres du parc instrumental national PGrav de l'Institut des sciences de l'univers du CNRS (INSU). Cette campagne de mesure, qui incluait deux gravimètres à coin de cube et trois gravimètres quantiques, a notamment permis de vérifier la cohérence des mesures réalisées avec les différents instruments. Un prérequis indispensable pour les utiliser de manière indifférenciée sur des sites d'intérêt géophysique.

LA PAROLE À... GUILLAUME JUBEAUX, À

COFONDATEUR DE LA SOCIÉTÉ BIOMAE (GROUPE CARSO), MEMBRE DE L'ASSOCIATION FRANCE EAU BIOSURVEILLANCE.

LE MAINTIEN DE LA QUALITÉ DES EAUX NÉCESSITE LE DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES INNOVANTES POUR LE SUIVI DES POLLUTIONS CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES. DANS CE CADRE, LE LNE ET L'ASSOCIATION FRANCE EAU BIOSURVEILLANCE ONT MENÉ UN PROJET DE RECHERCHE PARTENARIALE POUR LA MISE EN PLACE DE NOUVEAUX RÉFÉRENTIELS DE CERTIFICATION DANS LE DOMAINE DES ANALYSES ÉCOTOXICOLOGIQUES ET DE BIOSURVEILLANCE.



«LE LNE NOUS A MONTRÉ COMMENT INSCRIRE NOS MÉTHODES D'ANALYSE DANS UN CADRE MÉTHODOLOGIQUE RIGOUREUX.»

Filière Eau signé avec l'État français, a piloté le projet : «mieux détecter les micropolluants à l'aide de la biosurveillance pour mieux les traiter». C'est dans le cadre de ce projet structurant pour la filière française de l'eau qu'est né ce projet de certification de ces nouveaux outils de mesure, avec le LNE comme partenaire naturel pour accompagner cette ambition.

Quel était précisément son contenu ?

G.J. : L'objectif était double. À partir d'une série de discussions et d'échanges, nous avons premièrement élaboré un référentiel «technique» qui énumère les critères d'application (matrices, type de réponses) et de performance (répétabilité, sensibilité, robustesse) à définir pour qu'une nouvelle méthode d'analyse écotoxicologique puisse obtenir une certification par le LNE. Une des originalités de ce référentiel est de permettre une vérification technique sans nécessairement en passer par une comparaison inter-laboratoire, lorsque le laboratoire est le seul à développer et à mettre en œuvre une méthode d'analyse. Deuxièmement, nous avons mis au point un référentiel «qualité» qui fixe des objectifs quant à la démarche du suivi client (conseils apportés et offre adaptée au besoin, communication durant les études et gestion des réclamations) et à l'obtention des résultats (traçabilité des échantillons, archivage des données).

Que reprenez-vous de cette expérience avec le LNE ?

G.J. : Nous sommes bien entendu des experts des méthodes d'analyse que nous proposons. En revanche, le LNE nous a montré comment les inscrire dans un cadre méthodologique rigoureux permettant de démontrer leur pertinence et leur robustesse. À titre personnel c'était très intéressant de participer à cet exercice, et c'était surtout une nécessité pour que les acteurs de la filière eau utilisent en routine ces nouveaux outils de mesure innovants, en ayant confiance dans les résultats produits.

Quel a été le point de départ de ce projet de recherche partenariale ?

Guillaume Jubeaux : Le point de départ, ce sont des entreprises, souvent issues de laboratoires de recherche français, qui proposent des solutions innovantes pour l'analyse écotoxicologique de l'eau et des milieux aquatiques. Par exemple, la société BIOMAE propose des tests permettant de mesurer les effets de polluants chimiques via l'analyse de réponses biologiques chez une espèce de crustacé d'eau douce (le gammare). Là où les analyses chimiques se focalisent sur une liste non exhaustive de substances chimiques et n'indiquent pas si les concentrations mesurées sont toxiques, l'analyse des effets biologiques permet de renseigner sur l'effet des mélanges complexes de produits chimiques (communément appelé «effet cocktail»). Quoi qu'il en soit, pour que ces nouvelles méthodes puissent être diffusées largement auprès des acteurs du suivi de la qualité de l'eau (agences de l'eau, collectivités territoriales, syndicats de rivières, industriels...), il convient de les normaliser et/ou de les certifier afin d'en démontrer la fiabilité et ainsi créer plus de confiance auprès des utilisateurs.

C'est ainsi que vous vous êtes tournés vers le LNE ?

G.J. : L'association « France Eau Biosurveillance », créée dans le cadre des objectifs fixés par le Contrat Stratégique de la

SANTÉ ET SÉCURITÉ DES CITOYENS

LA MÉDECINE A BESOIN DE BONNES MESURES. POUR FIABILISER LES EXAMENS BIOMÉDICAUX, ASSURER LA JUSTE DÉLIVRANCE DE MÉDICAMENTS OU ÉVALUER LA CAPACITÉ D'INTELLIGENCES ARTIFICIELLES À ANALYSER DES RÉSULTATS DE MESURE OU DES IMAGES. EN SANTÉ ET SÉCURITÉ, LE LNE ET LE RNMF PROPOSENT DES SOLUTIONS SUR TOUS LES FRONTS.

UNE NOUVELLE RÉFÉRENCE NATIONALE POUR FIABILISER L'INJECTION DE MÉDICAMENTS

GRÂCE AU DÉVELOPPEMENT DE DEUX BANCS D'ÉTALONNAGE, LE LNE-CETIAT FAIT DÉSORMAIS PARTIE DU CLUB TRÈS RESTREINT DES LABORATOIRES NATIONAUX DE MÉTROLOGIE CAPABLES D'ÉTALONNER DES DÉBITMÈTRES JUSQU'À QUELQUES DIZAINES DE NANOLITRES PAR HEURE.

Chaque année, 10 000 accidents de dosage médicamenteux sont recensés dans l'Union européenne. Parmi eux, peu sont liés à des problèmes d'étalonnage des dispositifs médicaux (pompe à perfusion, pousse-seringue...) impliqués. Pour autant, on conçoit toute l'importance qu'une telle administration d'un traitement se fasse dans des conditions de traçabilité métrologique. Dans ce but, deux projets européens, MeDD et MeDDII, auxquels a participé le LNE-CETIAT, visaient à améliorer l'exactitude du dosage de médicaments pour de très faibles débits. À leur terme, ils permettent au laboratoire français d'élargir son offre d'étalonnage jusqu'à des débits de quelques nanolitres par heure.

Lors du premier projet, les chercheurs français ont mis au point un banc de référence primaire pour la mesure de débits compris entre 10 L/h et 1 mL/h. Fondé sur une méthode gravimétrique, il consiste en une balance mesurant l'accroissement d'une masse de fluide par unité de temps, d'où l'on déduit le débit correspondant. «Il s'agissait pour nous d'étendre nos moyens de mesure jusqu'à alors limités au macro-débits», précise Florestan Ogheard, référent technique en débitmétrie au LNE-CETIAT.

Concrètement la mise en œuvre de ce banc a nécessité le développement d'un système de pesée et d'un générateur pressurisé stable entre 0,1 et 10 bar pour la délivrance de débits de fluide contrôlés. En outre, plusieurs effets physiques subtils ont dû être pris en compte pour assurer l'exactitude des mesures. Tout d'abord, s'agissant d'un dispositif impliquant un capillaire plongé dans un liquide, la poussée d'Archimède. Puis également la tension superficielle entre le liquide et la paroi du capillaire. Et enfin, l'évaporation.

Pour en tenir compte, les chercheurs ont modélisé l'ensemble de ces phénomènes et ont validé leurs résultats expérimentalement. À la clé : une incertitude sur les mesures de 0,1 % validée par des comparaisons internationales entre laboratoires. Ainsi, ce banc unique au monde, le seul permettant de réaliser des étalonnages entre 10 °C et 50 °C (et pas seulement à température ambiante) et jusqu'à 10 bar, est désormais référence nationale et permet au CETIAT de réaliser entre 70 et 100 étalonnages par an.

À la suite de ces travaux, le laboratoire s'est attelé, entre 2019 et 2022, aux mesures de débits jusqu'à 60 nL/h. «Cela correspond à une goutte par mois ou à une durée de remplissage d'une baignoire en 300 000 ans !», précise Florestan Ogheard. C'est très peu, mais néanmoins typique des débits délivrés par les pompes à insuline dont sont équipés 60 000 personnes diabétiques en France.



Trois questions à...

FLORESTAN OGHEARD, CHARGÉ D'ÉTUDES AU CETIAT

Avant les projets MeDD et MeDDII quel était le rang du LNE-CETIAT pour les étalonnages de débitmètres ?

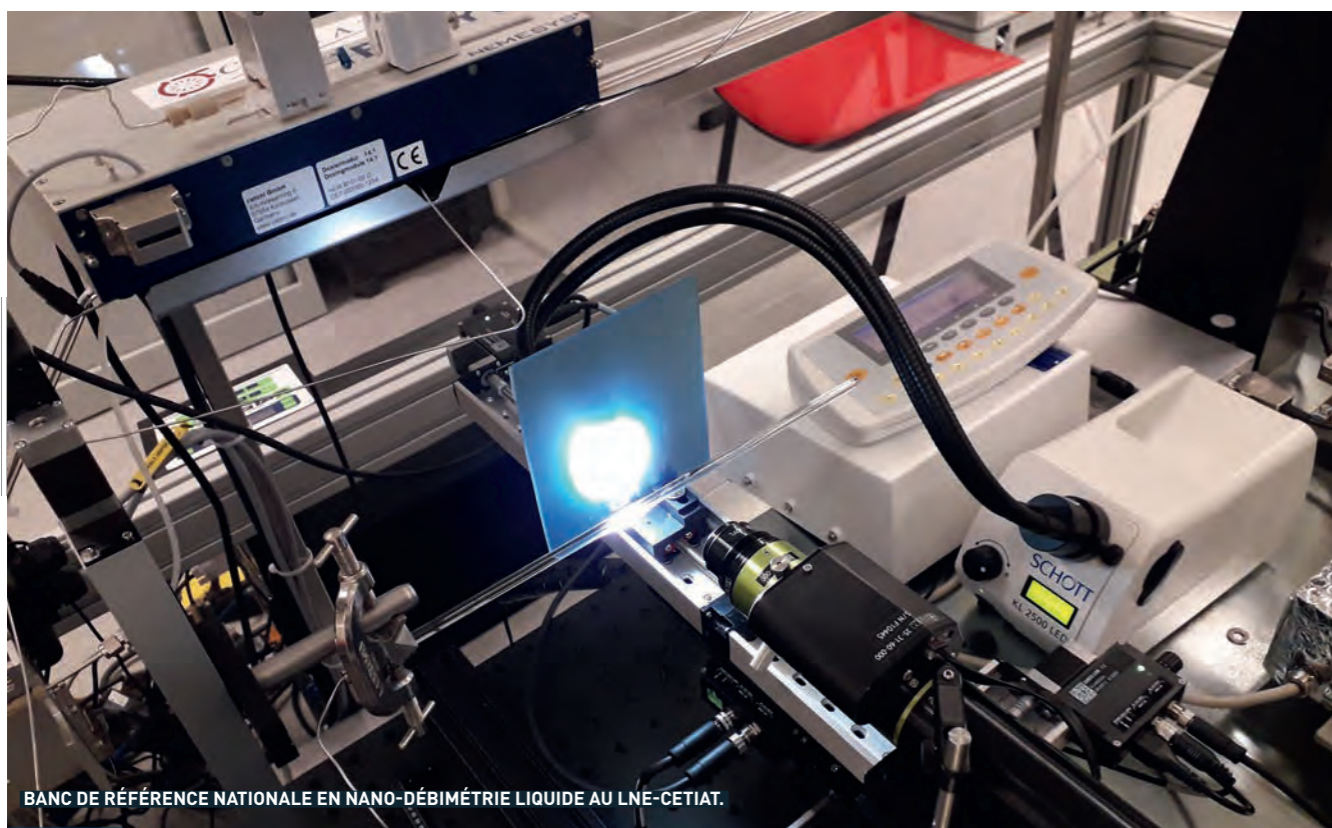
F.O. : Le CETIAT, associé au LNE depuis 2002, est le laboratoire du réseau national de la métrologie française (RNMF) en charge de la référence nationale en débitmétrie liquide. Jusqu'en 2012, la limite basse de la référence nationale était de 8 kg/h. Cette année-là, l'inauguration du banc de micro-débitmétrie a permis d'abaisser cette limite d'un facteur 8 000. Et depuis l'année dernière, nous l'avons repoussé à 10 nL/min. Seuls quatre laboratoires dans le monde disposent d'un étalon national dans cette gamme de débit. J'ajoute que nous effectuons environ 700 étalonnages par an et cultivons de ce fait avec les industriels un lien très fort qui nous permet d'anticiper leurs besoins.

Que changent pour vous la réalisation de ces deux projets ?

F.O. : Ils nous ont permis d'approfondir notre expérience en caractérisation métrologique des dispositifs médicaux. Et le second projet nous a également fait découvrir le monde de la micro- et nanofluidique. Nous sommes désormais consultés par les industriels de ces secteurs pour les aider dans leur R&D et dans la phase de qualification de leurs dispositifs et instruments avant mise sur le marché.

Comment vous projetez-vous dans la suite ?

F.O. : Nous poursuivons nos travaux de recherche en microfluidique, notamment au sein du projet européen MFMET «Establishing metrology standards in microfluidic devices» qui a débuté en juin 2021, pour 3 ans, et dont le LNE-CETIAT est le coordinateur scientifique. Nous développons actuellement des méthodes d'essai et d'étalonnage adaptées au secteur de la microfluidique, afin d'améliorer la qualité et la fiabilité des produits (laboratoires et organes-sur-puces, tests de dépistages...).



BANC DE RÉFÉRENCE NATIONALE EN NANO-DÉBITÉTRIE LIQUIDE AU LNE-CETIAT.

Pour réaliser des étalonnages à de tels niveaux de débit, une méthode gravimétrique aurait nécessité des mesures pendant plusieurs dizaines d'heures. En pratique, impossible ! Aussi les scientifiques ont-ils opté pour une méthode optique.

Son principe : dans un capillaire, un liquide dont on mesure la vitesse d'écoulement en suivant le déplacement de son ménisque avec une caméra. La connaissance de la section du tube permet de déduire le débit fluide. La caméra enregistre des images 200 fois par seconde à une cadence contrôlée par un générateur de fréquence relié par GPS aux étalons nationaux de fréquence du LNE-SYRTE. Et pour le traitement d'image, les métrologues ont développé un algorithme maison capable de corrélérer le déplacement du ménisque d'une image à l'autre, en tenant compte des distorsions optiques en même temps que des modifications d'aspect et de forme du ménisque pendant la mesure. De quoi in fine mesurer avec exactitude chaque déplacement du ménisque et offrir la possibilité de réaliser un étalonnage dynamique, c'est-à-dire quasi en temps réel, quelles que soient les fluctuations de débit.

Par ailleurs, les chercheurs ont également conçu une technique d'imagerie adaptée à la même caméra pour mesurer la section du capillaire. Ces mesures ont ensuite été validées par microscopie confocale. Quant aux frottements du fluide sur le tube, ils ont été éliminés par un traitement de la surface interne du tube par un film hydrophobe. «Tous ces développements ont fait l'objet d'une thèse de doctorat menée en cotutelle entre le LNE-CETIAT et le Laboratoire Gulliver», tient à rappeler le chercheur.

In fine, le banc d'étalonnage a fait l'objet de comparaisons internationales. Résultat : des incertitudes de mesure ne dépassant pas 12 % dans la gamme des plus faibles débits. Et une installation qui place désormais le LNE-CETIAT parmi les quatre laboratoires au monde capables d'étalonner des débitmètres pour de très faibles débits. Depuis août dernier, le nouveau banc est reconnu par la communauté internationale des métrologues comme une référence nationale, et un premier étalonnage de pompes à insuline a déjà été réalisé pour un fabricant de ce dispositif médical.

CHIFFRES CLÉS

Avec des incertitudes de mesure de 0,1 % et 0,15 % respectivement des microdébits et des nanodébits, le LNE-CETIAT est parmi les meilleurs du monde en la matière. Il est également le seul laboratoire au monde à pouvoir réaliser des étalonnages à température variable, entre 10 °C et 50 °C.

«IL S'AGISSAIT POUR NOUS D'ÉTENDRE NOS MOYENS DE MESURE JUSQU'ALORS LIMITÉS AU MACRO-DÉBITS.»

FLORESTAN OGHEARD,
CHARGÉ D'ÉTUDES AU CETIAT

UNE MÉTHODE DE RÉFÉRENCE POUR LE DOSAGE DE LA PROCALCITONINE

Le sepsis est défini comme une défaillance de la réponse immunitaire de l'organisme à une infection. En l'absence d'un traitement rapide, il peut évoluer en une défaillance de différents organes et menacer la vie des patients. Ainsi, l'objectif du projet européen SEPTIMET, terminé en février, et auquel l'équipe de métrologie chimique du LNE a participé, visait à améliorer la reproductibilité, la fiabilité et la rapidité du diagnostic du sepsis.

La procalcitonine (PCT) est une protéine couramment dosée pour aider au diagnostic. Disposer de résultats de mesure fiables de la PCT est donc indispensable. Or, la comparabilité des kits de dosage disponibles n'est pas parfaite.

Pour y remédier, les chercheurs du LNE ont mis au point une méthode de mesure de référence par spectrométrie de masse, dont la traçabilité au SI est assurée par l'utilisation d'un étalon

primaire protéique. Cette méthode pourra ainsi permettre de certifier des matériaux de référence secondaire, également développés par le laboratoire à partir d'échantillons issus de patients. Ces matériaux seront destinés à l'étalonnage et au contrôle qualité des kits par leurs fabricants ou leurs utilisateurs. En collaboration avec une équipe du CEA, le LNE a également étudié la possibilité de doser simultanément huit biomarqueurs protéiques du sepsis par spectrométrie de masse. «*Cette étude de faisabilité a montré que la détection était possible et peut ouvrir la voie à un enrichissement des outils diagnostiques et métrologiques*», indique Amandine Bœuf, coordinatrice du projet au LNE. Un ensemble de résultats importants alors que chaque heure d'attente supplémentaire sans traitement adapté diminue les chances de survie des patients de 8 %.

LA PROTÉINE TAU, UN MARQUEUR DÉSORMAIS TRACÉ DE LA MALADIE D'ALZHEIMER

La mise en place de traitements curatifs des maladies neuro-dégénératives, telles les maladies d'Alzheimer ou de Parkinson, est étroitement liée à la possibilité de diagnostiquer au plus tôt ces affections. Pour ce faire, un cadre métrologique spécifique doit être développé pour améliorer la fiabilité et la comparabilité des mesures réalisées pour établir un diagnostic. C'était l'objet du projet européen NeuroMET2, terminé en décembre dernier.

Imagerie, tests cognitifs et dosage de biomarqueurs, plusieurs approches ont été investiguées. De leur côté, l'équipe de bioanalyse du LNE a mis au point une méthode de référence par spectrométrie de masse pour le dosage, dans le liquide céphalorachidien, de la protéine Tau total (t-Tau), un biomarqueur de la maladie d'Alzheimer. Ils ont également caractérisé

une forme synthétique de cette protéine comme étalon primaire pour établir la traçabilité métrologique de ces dosages et certifier la concentration de Tau dans des échantillons de liquide céphalorachidien.

En parallèle, les scientifiques ont développé un étalon primaire pour le dosage de la protéine Tau phosphorylée (p-Tau), qui est un biomarqueur plus précoce. «*Malgré la difficulté de doser avec exactitude des protéines modifiées aussi peu abondantes, nous sommes parvenus à développer une méthode de référence avec une incertitude de mesure inférieure à 10 %*», détaille Chiara Giangrande, responsable du projet au LNE.

Dans les prochains mois, le laboratoire pourrait démarrer la coordination d'un nouveau projet visant à standardiser les mesures de ces biomarqueurs dans le sang.

«NOUS SOMMES PARVENUS À DÉVELOPPER UNE MÉTHODE DE RÉFÉRENCE AVEC UNE INCERTITUDE DE MESURE INFÉRIEURE À 10 %.»

CHIARA GIANGRANDE,
RESPONSABLE DU PROJET AU LNE



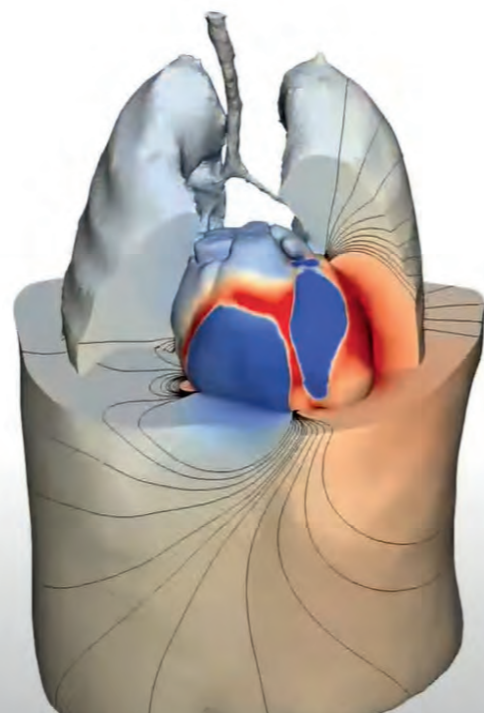
CHROMATOGRAPHE EN PHASE LIQUIDE COUPLÉ AU SPECTROMÈTRE DE MASSE (LC-MS2) POUR LA DÉTERMINATION DE COMPOSÉS ORGANIQUES (ACQUITY PREMIER (UPLC) XEVA TQ-S MICRO (MS2) WATERS).

UNE PLATEFORME POUR LA VALIDATION DE SYSTÈMES AUTOMATIQUES DE DÉTECTION DES MALADIES CARDIOVASCULAIRES

Les maladies cardiaques sont responsables de 3,9 millions de décès par an dans les pays de l'Union européenne. Aujourd'hui, on assiste au développement de systèmes de détection automatisés pour le diagnostic des affections cardiovasculaires à partir d'électrocardiogrammes (ECG). Le projet européen MedalCare, achevé l'année dernière et auquel le LNE a participé, visait à proposer une série d'outils pour la validation de ces algorithmes et des techniques d'apprentissage sous-jacentes.

Dans ce cadre, les métrologues européens ont constitué la première base de référence de données synthétiques d'électrocardiogrammes. Documentant plus de 80 maladies, elle comprend plusieurs dizaines de milliers d'enregistrements. À partir de là, « nous avons évalué la capacité de différents algorithmes, à l'état de l'art, à reconnaître des pathologies dans une base de données aussi bien virtuelles que réelles, et selon que leur apprentissage avait été fait à partir d'enregistrements réels ou synthétiques », détaille Loïc Coquelin, chercheur en science des données.

Les métrologues ont également examiné l'effet de différentes sources d'incertitude (échantillonnage des ECG, nombre d'enregistrements...) et de bruits sur les performances et la robustesse des algorithmes. Enfin, les métrologues ont produit une première estimation des contributions à l'incertitude de détection. Dans un secteur en plein essor, les outils développés constituent un premier modèle de plateforme de validation métrologique de systèmes automatiques de détection de pathologies cardiovasculaires.



DISTRIBUTION DU POTENTIEL EXTRACELLULAIRE DANS LE CŒUR ET LE THORAX PENDANT UN BATTEMENT DE CŒUR NORMAL.

L'IMAGERIE MÉDICALE ENTRE DANS L'ÈRE DE LA MESURE

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) permet des examens médicaux qualitatifs. Aujourd'hui, le développement de la tomographie des propriétés électriques (EPT) et de l'empreinte digitale par résonance magnétique (MRF), laisse entrevoir la possibilité d'examens quantitatifs non invasifs. Finalisé l'année dernière, le projet européen QUIERO visait à introduire des premières bases métrologiques dans ces nouvelles techniques d'imagerie.

Précisément, les spécialistes en science des données du LNE participant au projet ont évalué la capacité de logiciels d'analyse associés à ces techniques à fournir une cartographie quantitative des signaux électriques et magnétiques enregistrés par EPT et MRF. Pour ce faire, les métrologues ont notamment travaillé à partir des données graphiques de « fantômes » déterminées

pour ces deux techniques par leurs partenaires européens, c'est-à-dire des objets de référence dont les caractéristiques électromagnétiques sont connues et comparables à celles de tissus humains. « Nous avons également réalisé des simulations numériques des résultats de ces examens et étudié en détail la façon dont se propagent les erreurs le long de la chaîne d'analyse », explique Sébastien Marmin du LNE.

Conclusion : même s'il est encore difficile d'identifier une pathologie particulière, il est néanmoins déjà possible de faire la différence entre un organe sain et une autre pathologie, sur la base des signaux obtenus par EPT et MRF. Ces techniques enrichiront à terme les possibilités de diagnostic offertes par l'imagerie médicale alors que plus de 30 millions de « scans » sont effectués chaque année en Europe.

RADIOTHÉRAPIE X À FAIBLE ÉNERGIE : LE RACCORDEMENT AU SI EST DÉSORMAIS POSSIBLE

La curiethérapie électronique permet le traitement de certains cancers avec des rayons X de faible énergie au contact de la tumeur. Elle vise le traitement des tumeurs situées en faible profondeur ou accessibles par voies naturelles (ORL, peau, sein, colon) quand l'utilisation des photons de haute énergie est moins adaptée. Néanmoins, cette technique souffrait d'un manque en matière de caractérisation dosimétrique. Le projet européen PRISM-eBT, auquel le LNE-LNHB a participé y a remédié.

Précisément, les praticiens constataient que la dose prescrite calculée par les algorithmes des fabricants d'appareils pouvait être sensiblement différente de celle délivrée. Ainsi, les métrologues ont mis en place une référence métrologique pour la mesure absolue de la dose délivrée par les tubes à rayons X

miniaturisés utilisés pour ces traitements. Ils ont également mis au point un dosimètre à base de gel, capable de mesurer les distributions 3D des doses délivrées. Etalonné grâce à la nouvelle référence métrologique, il permet ainsi la caractérisation précise de la dose délivrée à l'hôpital. De leur côté, des partenaires du projet ont développé d'autres dosimètres fonctionnant selon différents principes. « Nous avons comparé les mesures d'où il ressort une incertitude sur la valeur de la dose délivrée réduite à environ 7 % contre 20 auparavant », indique Valentin Blideanu, chercheur au LNE-LNHB. Un résultat qui devrait accélérer l'adoption de cette technique thérapeutique par les médecins, plus confiants désormais quant aux valeurs de la dose délivrée lors de ces nouveaux traitements.

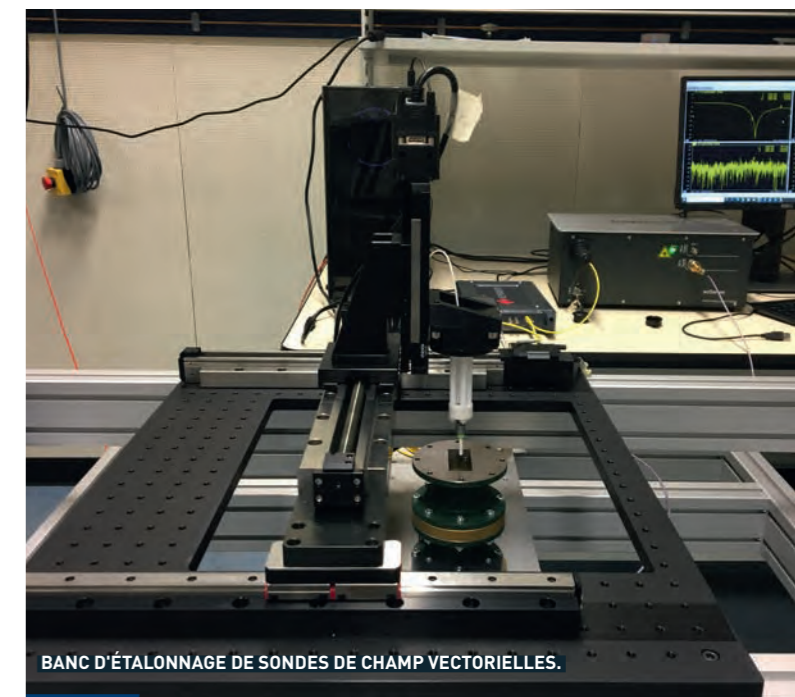
TÉLÉPHONES PORTABLES, LEURS ÉMISSIONS EM DÉSORMAIS TRAÇABLES AU SI

Avant leur mise sur le marché, les téléphones portables sont soumis à des essais de conformité en matière d'absorption d'énergie électromagnétique (EM) par le corps humain. Pour ce faire, le champ électrique rayonné par le téléphone à travers un liquide, dont les propriétés électriques sont proches de celles du corps humain, est mesuré à l'aide de capteurs. On en déduit un débit d'absorption spécifique, le DAS, qui doit être accessible à l'acheteur de l'appareil.

Dans ce contexte, le LNE a développé deux bancs d'étalonnage de systèmes utilisés pour les mesures de DAS. Cela avait débuté par le projet européen EMPIR, Vector-SAR, qui a été piloté par l'équipe de métrologie électrique haute fréquence du LNE. Clos en 2020, il était destiné à soutenir une démarche de normalisation des mesures de DAS avec des systèmes multicapteurs.

Précisément, les chercheurs de cette équipe ont mis en place un premier banc pour la détermination de la permittivité diélectrique et de la conductivité de liquides utilisés pour les mesures de DAS, jusqu'à 6 GHz. Le second banc, fondé sur une structure en guide d'onde complètement caractérisée, permet d'étalonner tout type de sonde de champ électrique de 4,5 à 5,5 GHz. Une extension du banc est prévue pour les fréquences usuelles de télécommunication, « à terme, il permettra aussi d'assurer la traçabilité d'un système multicapteur complet », complète Jean-Marie Lerat, responsable de l'équipe HF.

Les deux bancs, désormais opérationnels, renforcent les capacités de mesure du LNE au service de la protection du consommateur. Le LNE est par ailleurs engagé auprès du Comité européen de normalisation en électronique et en électrotechnique (CEN-CENELEC) pour faire évoluer les méthodes de mesure de DAS.



BANC D'ÉTALONNAGE DE SONDES DE CHAMP VECTORIELLES.

« À TERME, LE BANC PERMETTRA AUSSI D'ASSURER LA TRAÇABILITÉ D'UN SYSTÈME MULTICAPTEUR COMPLET. »

JEAN-MARIE LERAT,
RESPONSABLE DE L'ÉQUIPE ÉLECTRICITÉ HF AU LNE

LA PAROLE À... LA PAROLE À

ÉVELYNE ESCARMANT, DIRECTRICE OPÉRATIONNELLE QUALITÉ & COMPLIANCE CHEZ STAGO

PIERRE GRANDET, SPÉCIALISTE ASSURANCE QUALITÉ SYSTÈME CHEZ DIABELOOP

IL N'EXISTE PAS ENCORE DE RÉGLEMENTATION SPÉCIFIQUE CONCERNANT LES ASPECTS IA ET CYBERSÉCURITÉ POUR LES DISPOSITIFS MÉDICAUX. MAIS L'UNION EUROPÉENNE EST EN TRAIN DE PRÉPARER UN RÈGLEMENT DIT *CYBERSECURITY ACT* QUI PERMETTRA DE DÉVELOPPER DES SCHÉMAS DE CERTIFICATION DANS CE DOMAINE. DANS CE CADRE, LE LNE ET SES PARTENAIRES INDUSTRIELS, STAGO ET DIABELOOP, ONT ÉTABLI UN PROTOCOLE D'ÉVALUATION D'UN DISPOSITIF MÉDICAL EN TERMES DE CYBERSÉCURITÉ, ET DE LA PERFORMANCE DES ALGORITHMES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EMBARQUÉS DANS CE MÊME DISPOSITIF.



Vous avez développé avec le LNE un projet de recherche partenariale. Quels étaient vos besoins ?

Evelyne Escarmant : Nous commercialisons des automates d'analyses sanguines pour le suivi de la coagulation. Une partie de ces analyses est fondée sur des algorithmes d'intelligence artificielle (IA). Par ailleurs, s'agissant de données de santé, nous devons assurer leur sécurité numérique. Dans ces deux domaines, il n'existe pas encore de réglementation spécifique. Nous souhaitons donc par anticipation définir un protocole d'évaluation qui permette de démontrer la performance de nos algorithmes et d'évaluer la sécurité de nos systèmes.

Pierre Grandet : Nous fabriquons des systèmes embarquant un algorithme auto-apprenant, véritable intelligence artificielle thérapeutique, pour automatiser le traitement du diabète en boucle fermée. Nous avons donc des problématiques d'IA et de cybersécurité. À terme, une réglementation européenne encadrera l'utilisation d'algorithmes d'intelligence artificielle. Nous souhaitons donc l'anticiper. Concernant la cybersécurité, nous effectuons des tests réguliers de nos dispositifs. Nous souhaitons un avis complémentaire de la part d'un organisme reconnu comme tiers de confiance en la matière.

Concrètement, quelle forme a pris ce partenariat avec le LNE ?

E.E. : Le LNE a tout d'abord réalisé une importante veille dans les deux domaines concernés, afin d'en tirer des exigences qui



semblaient pertinentes à considérer dans le cadre d'une évolution des textes normatifs et réglementaires. Sur cette base, nous avons ensuite été audités par le laboratoire. Sur l'IA, les enjeux ont essentiellement concerné les phases de design du produit et son suivi après la mise sur le marché. Pour la cybersécurité, l'approche était plus globale.

P.G. : De même, le LNE a préparé, pour nous, un référentiel d'évaluation, avant de réaliser un audit qui nous a permis d'identifier les points importants que nous devons prendre en compte afin d'être en conformité avec ce référentiel.

Quel bilan tirez-vous de cette expérience avec le LNE ?

E.E. : Ce partenariat a été pour nous l'occasion de nous familiariser avec les exigences potentielles d'une future réglementation et ainsi de les devancer. Concernant la cybersécurité, cela nous a indiqué des voies de développement. Et sur l'ensemble de la problématique, l'audit a constitué en quelques sortes un entraînement à ce type d'exercice courant pour démontrer la conformité et les performances d'un produit.

P.G. : Grâce à ce partenariat, nous avons affiné notre perception des exigences en matière d'IA et de cybersécurité. Nous en avons bien sûr une connaissance, mais elle est désormais plus précise et plus fine, grâce à un échange de points de vue très enrichissant. Cela nous permettra de répondre positivement aux exigences réglementaires à venir.

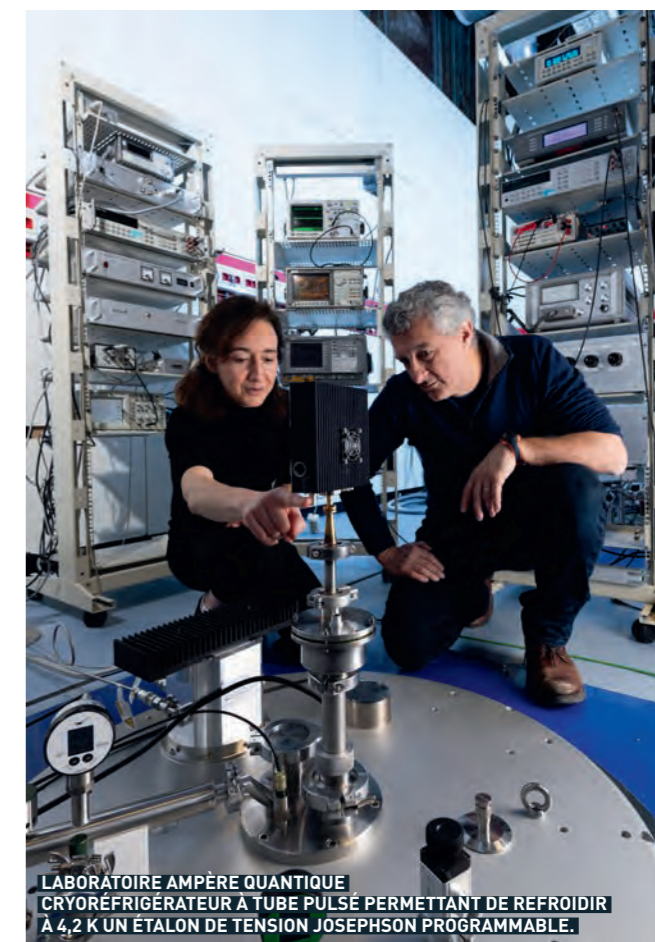
MÉTROLOGIE FONDAMENTALE

LA MÉTROLOGIE N'A DE CESSÉ D'AMÉLIORER LA RÉALISATION DES UNITÉS FONDAMENTALES DE MESURE ET DE LES DISSÉMINER AU PLUS JUSTE. DE MÊME, ELLE CHERCHE À ÉTENDRE TOUJOURS PLUS L'ART DE LA MESURE À DE NOUVELLES APPLICATIONS. POUR CE FAIRE, ELLE CONVOQUE TOUTES LES SCIENCES, Y COMPRIS LES MATHÉMATIQUES QUI PERMETTENT D'ÉVALUER L'INCERTITUDE SANS LAQUELLE UNE MESURE N'APAS DE SENS.

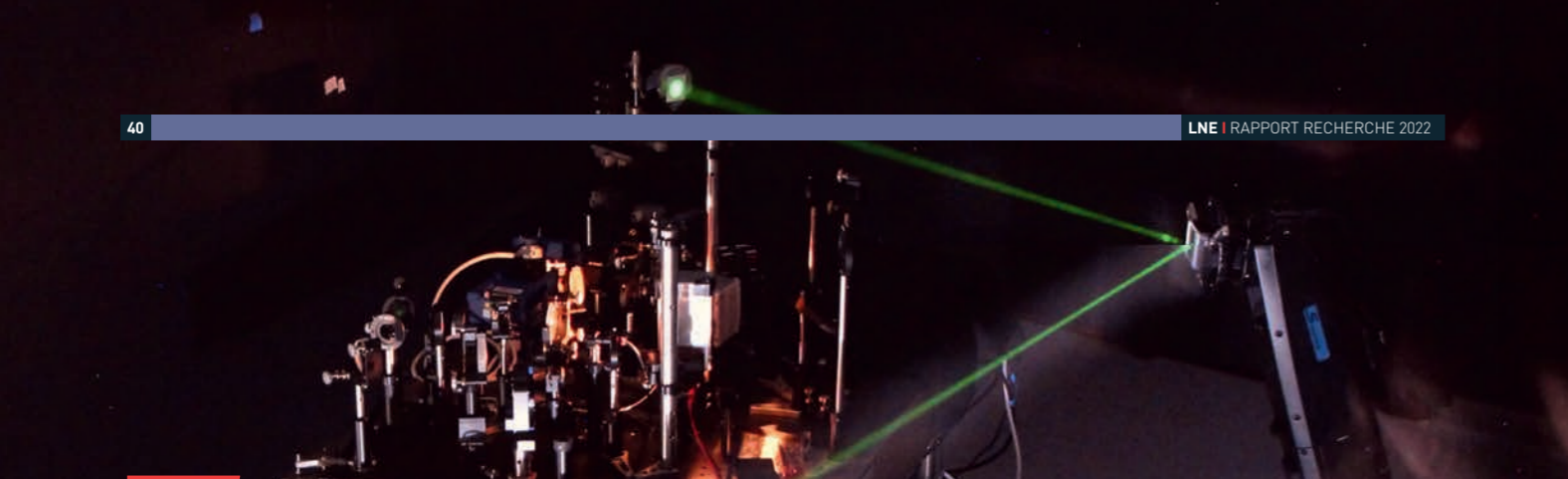


L'AMPÈRE QUANTIQUE A DÉSORMAIS SON LABORATOIRE

En 2016, le LNE a fait la démonstration d'un étalon de courant électrique réalisant la définition de l'ampère de 2018, à partir des étalons quantiques de tension et de résistance. Depuis lors, le LNE améliore son système de mesure et crée un laboratoire visant à faire de cet étalon une référence compacte, robuste et pérenne, comme en témoignent les travaux réalisés l'année passée. En 2022, les chercheurs en électricité quantique ont ainsi intégré les réseaux de jonctions Josephson, réalisant l'étalon quantique de tension, dans un cryoréfrigérateur à tube pulsé. À cette occasion, ils ont pu tester les performances des réseaux fournis par leurs partenaires allemands de la PTB. Par ailleurs, un nouveau dispositif a été développé pour amplifier le courant quantifié, après sommation des courants issus des connexions entre les deux étalons de tension et de résistance, avec un gain exact à 10^{-10} près. « Nous pourrions ainsi ajouter une troisième connexion entre les deux étalons, afin de s'affranchir totalement des résistances parasites à l'origine des erreurs sur le courant quantique de référence », complète Sophie Djordjevic, coresponsable, avec Wilfrid Poirier, de ce projet de métrologie. À terme, cet amplificateur sera installé lui aussi dans le même cryostat que les réseaux Josephson, simplifiant encore un peu plus l'ensemble du dispositif. Et l'étalon de résistance à effet Hall quantique sera lui aussi placé dans un cryoréfrigérateur à tube pulsé, afin de réduire la consommation d'hélium liquide actuellement nécessaire pour le maintenir à la température de 4,2 K. L'installation permet l'étalonnage d'ampèremètres et permettra dans un avenir proche d'étalonner des sources de courant, et à moyen terme des résistances, aux meilleures incertitudes de mesure.



LABORATOIRE AMPÈRE QUANTIQUE
CRYORÉFRIGÉRATEUR À TUBE PULSÉ PERMETTANT DE REFRIGÉRER
À 4,2 K UN ÉTALON DE TENSION JOSEPHSON PROGRAMMABLE.



LA MÉTROLOGIE DE L'APPARENCE PRÊTE POUR DES MESURES DANS LE SI

LE GONIOSPECTROPHOTOMÈTRE

du LNE-CNAM est un instrument multifonction permettant de mesurer diverses propriétés optiques directionnelles de surfaces, en réflexion (BRDF) et en transmission (BTDF). Il a la meilleure résolution angulaire jamais atteinte à ce jour ($0,017^\circ$) et permet désormais de caractériser des surfaces à l'échelle submillimétrique (μ BRDF) et des surfaces translucides (BSSRDF).



GONIOSPECTROPHOTOMÈTRE DU LNE-CNAM.

Répondant à une demande économique forte, la métrologie de l'apparence des objets est en plein essor. Leader dans le domaine, le LNE-CNAM a coordonné le projet européen BxDiff, finalisé l'année passée. Il visait à faire progresser la métrologie primaire dans le domaine de la spectrophotométrie de la surface des matériaux.

C'est sur cette technique que se fondent les mesures d'apparence d'une surface. Elle permet en particulier de mesurer la fonction de répartition du facteur de réflexion bidirectionnel (BRDF), pour décrire la couleur ou le brillant d'un objet. Sur cette grandeur, le laboratoire de radiométrie-photométrie du LNE-CNAM a participé à une comparaison internationale avec cinq autres laboratoires nationaux partenaires du projet, démontrant sa capacité à mesurer la BRDF, de manière absolue, avec une incertitude comprise entre 0,8 et 1,2 %.

Par ailleurs, les métrologues ont mené des travaux sur les effets de cohérence optique (speckle) qui se manifestent à très haute résolution angulaire. «*Nous en avons finalement proposé un modèle qui, à terme, permettra de raffiner encore les mesures de BRDF*», détaille Gaël Obein, coordinateur de BxDiff.

En parallèle, les métrologues ont développé une instrumentation pour la mesure de la μ BRDF, c'est-à-dire la BRDF d'une surface de quelques dizaines de micromètres de diamètre. Ils ont également eu un rôle moteur pour la définition et la mesure de nouveaux mesurands pour caractériser l'aspect visuel d'objets translucides (BSSRDF pour la lumière diffusée par réflexion sur la surface et BTDF pour la lumière transmise par la surface). D'ailleurs, le laboratoire a participé à des comparaisons interlaboratoires de mesures de la BTDF. C'est un premier pas vers l'établissement de la traçabilité au SI de la mesure de cette nouvelle grandeur relative à la transparence d'un objet.

MATHMET, UN RÉSEAU EUROPÉEN À LA CROISÉE DES MATHÉMATIQUES ET DE LA MÉTROLOGIE



Les réseaux européens de métrologie (EMN – *European Metrology Network*) créés au sein d'EURAMET visent à mettre en place des stratégies coordonnées entre les laboratoires nationaux de métrologie et à renforcer la pertinence et l'impact de leurs actions. Parmi eux, l'EMN MATHMET fédère depuis 2019 la communauté des mathématiciens et spécialistes des méthodes statistiques pour la métrologie. En 2022, le réseau a témoigné de son caractère central, à l'interface entre la communauté des mathématiciens, de la métrologie et de ses utilisateurs.

Du 2 au 4 novembre dernier, le LNE, en collaboration avec l'ENSAM, a ainsi organisé à Paris la 5e édition de la conférence internationale MATHMET. Rassemblant près de 80 participants, elle visait à promouvoir de nouvelles approches analytiques et calculatoires en métrologie.

De ce point de vue, l'EMN a publié l'année passée son plan de recherche stratégique. «*Il met en avant l'importance de déve-*

lopper des méthodes d'évaluation de l'incertitude de mesure adaptées aux nouvelles problématiques telles que le calcul intensif ou les mesures multi-capteurs», détaille Nicolas Fischer, membre correspondant du réseau au LNE. «*L'IA, l'apprentissage machine et la métrologie «virtuelle» pour les jumeaux numériques sont également considérés comme des domaines prioritaires.*»

Enfin, MATHMET poursuit sa vocation de diffusion des bonnes pratiques. Un atelier de travail a été organisé en ligne pour les métrologues des Balkans. Un *Quality Assessment Tool* (QAT) a également été mis en ligne pour aider les utilisateurs à mettre en place leurs propres outils de management de la qualité, pour valider des logiciels, des bases de données ou des guides en métrologie. Enfin, le site internet du réseau a vu le jour qui rassemble de nombreux contenus, complémentaires aux productions propres du Réseau.

THÈSES DE DOCTORAT SOUTENUES EN 2022

LNE

Saint-Clair Toguem Tagne

24 mai 2022
«Élaboration d'une mesure de cylindricité avec une incertitude nanométrique»
Université Paris-Saclay, Génie mécanique

Mathilde Veron

15 décembre 2022
«Systèmes de dialogue apprenant tout au long de leur vie : de leur élaboration à leur évaluation»
Université Paris Saclay, Informatique

LNE-CNAM

Safouane El Ghazouali

24 novembre 2022
«Contribution au développement d'une chaîne de métrologie traçable pour la mesure 3D de pièces complexes et de grande taille avec un système stéréo»
HESAM Université (Paris), Informatique et traitement d'images

Karim Mimoun

1^{er} décembre 2022
«Développement d'un thermomètre acoustique pour l'estimation de la température moyenne de l'air le long d'un chemin de mesure de distance par voie optique»
HESAM Université (Paris), Lasers, nanosciences et métrologie

Ferhat Loubar

14 décembre 2022
«Le kelvin quantique : vers une mesure optomécanique de température par corrélations quantiques et validation métrologique»
HESAM Université (Paris), Sciences pour l'ingénieur spécialité Lasers, nanosciences et métrologie

LNE-SYRTE

Shuo Zhang

13 avril 2022
«Spectral Hole Burning for ultra-stable lasers»
Université PSL (Paris), Physique

Romain Gautier

3 juin 2022
«Mesures de précision avec un gyromètre-accéléromètre à atomes froids double axe»
Sorbonne Université (Paris), Physique

Mads Tonnes

21 novembre 2022
«Understanding and exploiting metrological fiber networks for Sagnac sensing, frequency dissemination and geosensing»
Université PSL (Paris), Physique

Raphaël Piccon

7 décembre 2022
«Réalisation d'un gradiomètre atomique basé sur des séparatrices de Bragg»
Sorbonne Université (Paris), Physique

Yannick Foucault

19 décembre 2022
«Étude d'effets systématiques au niveau 1×10^{-18} sur des horloges à réseau optique au strontium et applications métrologiques»
Université PSL (Paris), Physique

LNE-LTFB

Bachir Achi

20 mai 2022
«Horloge optique miniature à ion piégé»
Université de Bourgogne Franche-Comté (Besançon), Sciences physiques pour l'ingénieur et Microtechniques

Santerelli Falzon Tetsing Tallan

30 juin 2022
«Laser stabilisé en fréquence sur une cavité Fabry-Pérot à très basse température»
Université de Bourgogne Franche-Comté (Besançon), Sciences physiques pour l'ingénieur et Microtechniques

Antoine Baudiquez

13 décembre 2022
«Métrologie et statistiques : de l'horlogerie aux pulsars millisecondes»
Université de Bourgogne Franche-Comté (Besançon), Sciences physiques pour l'ingénieur et Microtechniques

LNE-LNHB

Julien Jurczak

30 mars 2022
«Produit dose-surface pour la radiothérapie : application aux protocoles de traitements stéréotaxiques»
Université Paris-Saclay, Radio- et hadron-thérapies

Alice Rousseau

21 septembre 2022
«Développement d'une méthode de dosimétrie 3D par gel avec lecture optique pour la mise en place de contrôles qualité end-to-end en radiothérapie stéréotaxique»
Université Paris-Saclay, Radio- et hadron-thérapies

Béatrice Mauri

22 novembre 2022
«Étude et prototypage des détecteurs cryogéniques innovants pour la détection de la diffusion cohérente des neutrinos sur noyaux»
Université Paris-Saclay, Physique des particules

LNE-IRSN

Augusto Di Chicco

30 mars 2022
«Caractérisation d'un scintillateur cristallin organique pour des spectrométries neutroniques large bande en champs mixtes»
Université Aix-Marseille, Instrumentation

LNE-CETIAT

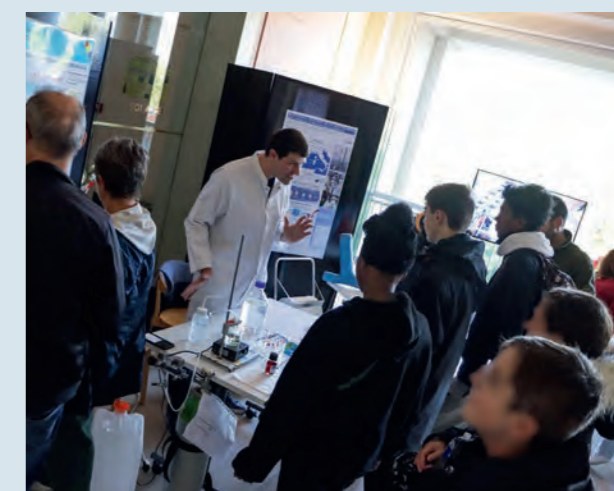
Abir Boudaoud

16 décembre 2022
«Développement d'un système de mesure de nano-débits de liquides»
PSL Université Paris, Physique

fête de la Science

FÊTE DE LA SCIENCE 2022 - PORTES OUVERTES DU LNE

Samedi 15 octobre, le LNE a ouvert les portes de ses laboratoires de Paris au grand public à l'occasion de la Fête de la science. Une journée de rencontre conviviale au cours de laquelle chercheurs, ingénieurs et techniciens du LNE, de ses partenaires du RNMF, de l'association Mesure Lab et d'AgroParis Tech, ont pu faire découvrir aux petits et grands le monde de la mesure et des essais autour d'une vingtaine d'ateliers et de plusieurs circuits de visite des laboratoires. Plus de 550 visiteurs ont ainsi été accueillis pour échanger sur les activités de mesure des nanoparticules, de la radioactivité, de l'acidité des océans ou encore sur les activités d'évaluation de l'intelligence artificielle. Des sous-sols jusqu'au toit du bâtiment, les visiteurs ont pu arpenter les couloirs du LNE et découvrir, en plus des ateliers, des installations de mesure et d'essais à la pointe de la technologie.



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 : [in](#) [twitter](#) [youtube](#)

Rédaction : Mathieu Grousson / LNE - Réalisation : LNE - Mars 2023
Crédits photos : Philippe Stroppa : p. 3, 5, 7, 15, 19, 30, 33, 36, 38, 39, - LNE : p. 1, 4, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 18, 20, 21, 27, 28, 34, 35, 43 - LNE/SYRTE : p. 1, 13 - LNE/CNAM : p. 40 - LNE/LADG : p. 25 - LNE/CETIAT : p. 32 - Adobe Stock : p. 4, 22, 24, - CITEO : p. 23 - BIOMAE : p. 29 - STAGO/DIABELOOP : p. 37 - DR

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

