

RAPPORT RECHERCHE  
2019

# ÉDITORIAL

**Thomas GRENON,**  
Directeur général



Le monde de la métrologie a été marqué en 2019 par un événement majeur : la mise en pratique des nouvelles définitions du Système international d'unités (SI).

Votées lors de la 26<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures en novembre 2018, ces nouvelles définitions sont entrées en application le 20 mai 2019, à l'occasion de la journée mondiale de la métrologie. Le SI est maintenant intégralement défini à partir de constantes fondamentales de la nature.

D'importants travaux de recherche ont été menés en 2019, afin d'assurer la continuité et la dissémination des mesures électriques, de température et de temps-fréquence. Des domaines dans lesquels les travaux du LNE et des laboratoires du RNMF sont parmi les meilleurs au monde.

L'année a également été marquée par le développement des activités de recherche du LNE en intelligence artificielle, avec l'utilisation du deep learning appliqué à la nano-caractérisation, ou l'évaluation de systèmes intelligents tels que les véhicules autonomes ou des logiciels de comparaison d'enregistrements vocaux.

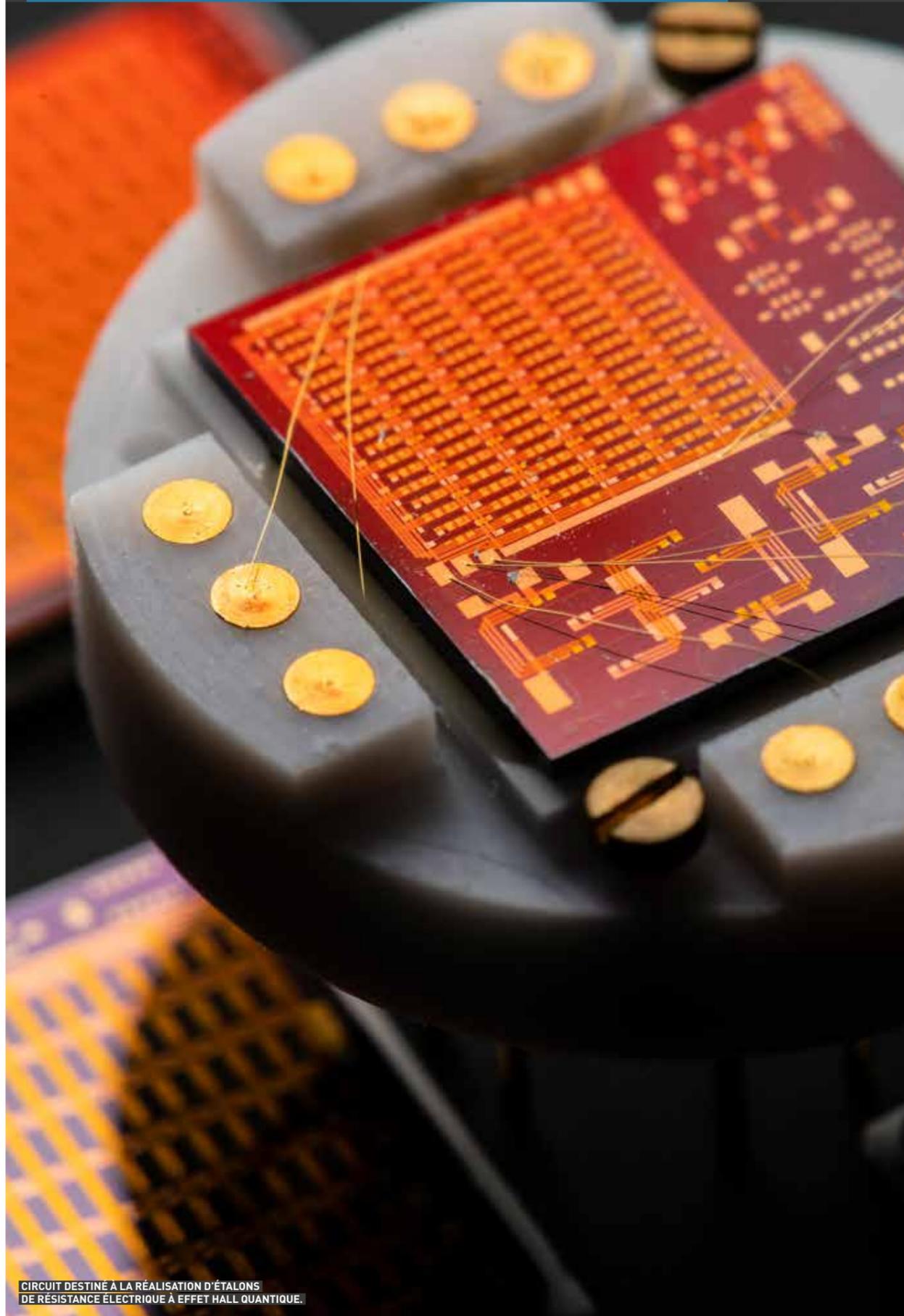
Enfin, en 2019, le LNE a continué d'affirmer son positionnement sur des enjeux sociétaux et environnementaux comme les mesures de qualité de l'air, la santé, ainsi que sur de nombreux sujets émergents et porteurs d'importants défis : les nanotechnologies, la fabrication additive et les technologies quantiques.

Dans un monde où l'innovation bouscule les référentiels établis, le LNE, en tant que laboratoire national de métrologie et pilote du Réseau national de la métrologie française, se doit d'accompagner les industriels et la société, au service de la compétitivité de notre économie et d'un développement durable et sûr. ■

# SOMMAIRE

<b>Editorial</b> .....	<b>3</b>
<b>Le LNE en 2019</b> .....	<b>7</b>
<hr/>	
<b>La mise en pratique et la dissémination du Système international d'unités ...</b>	<b>8</b>
• La métrologie française adopte le nouveau kelvin .....	9
• Très hautes températures : l'échelle de température de plus en plus exacte .....	11
• Étalons électriques, les miracles du graphène à portée de main .....	12
• Métrologie du temps : une station multi-GNSS est opérationnelle au LNE-SYRTE ..	13
<b>Santé : garantir la sécurité des citoyens</b> .....	<b>14</b>
• Une métrologie pour le suivi de nanoparticules dans le système digestif .....	15
• Une métrologie commune pour le dosage des hormones dans les matrices biologiques et environnementales .....	16
• Incinération des déchets : la toxicité des nanocomposites passée à la loupe .....	16
• Le LNE-LNHB accompagne le déploiement de la radiothérapie sous IRM .....	17
• Vérification des éthylotests et des éthylomètres : en route vers une métrologie européenne harmonisée .....	17
• Implants médicaux 3D, leur fiabilité métrologique augmentée .....	18
• Mieux diagnostiquer la maladie d'Alzheimer grâce à la protéine Tau .....	19
<b>Environnement et énergie : contribuer à un monde durable</b> .....	<b>20</b>
• AEROMET : la qualité de l'air à la loupe .....	21
• Mesures d'ammoniac dans l'air : vers un étalonnage aux fractions molaires les plus basses .....	22
• Un banc pour évaluer les performances des systèmes de capteurs de pollution atmosphérique .....	22
• Métrologie des impulsions hautes tensions, une offre renouvelée .....	23
• Les infrasons désormais dans le giron du Système International d'unités .....	24
• Un système numérique pour réduire le bruit de fond en spectroscopie gamma ...	24
• Champs de référence neutroniques : la précision à basse énergie en ligne de mire ...	25
• Compteurs d'eau : un protocole d'étalonnage enfin réaliste .....	25

<b>Industrie : accompagner l'innovation</b> .....	<b>26</b>
• La métrologie de l'apparence sur la voie de la maturité .....	27
• Transportables, des horloges atomiques bientôt accessibles à «tous» .....	28
• L'UMT ACTIA SafeMat désormais incontournable sur la sécurité des matériaux au contact .....	28
• Une métrologie pour les surfaces optiques complexes exactes à mieux que 30 nanomètres .....	29
• Tomographie X : un nouvel étalon multifonction .....	29
• Nanoparticules : vers des mesures de taille en milieu complexe .....	30
• Nanoparticules : naissance d'une métrologie dédiée .....	30
• Nano-métrologie : le renfort de l'intelligence artificielle .....	31
• Le LNE accompagne le déploiement des robots à la ferme .....	32
• Test de sécurité des véhicules autonomes : la solution virtuelle .....	33
• Voxcrim : une métrologie pour la comparaison d'enregistrements vocaux .....	33
<hr/>	
<b>Euramet, le choix gagnant de la métrologie européenne</b> .....	<b>34</b>
<hr/>	
<b>Le Prix LNE de la recherche</b> .....	<b>36</b>
• Marie-Christine Lépy : les rayons X au service de la métrologie .....	36
• Gaël Obein : la sensation au trébuchet de la métrologie .....	37
<b>«Le SI et la métrologie en France», un ouvrage sur les unités de mesure</b> .....	<b>39</b>
<b>La Fête de la Science au LNE</b> .....	<b>40</b>
<b>Habilitation à Diriger les Recherches et thèses soutenues</b> .....	<b>41</b>
<hr/>	
<b>Le réseau national de la métrologie française</b> .....	<b>42</b>



CIRCUIT DESTINÉ À LA RÉALISATION D'ÉTALONS DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE À EFFET HALL QUANTIQUE.

LA RECHERCHE AU LNE EN 2019, C'EST :

25 %  
du budget  
global du LNE

125  
projets de recherche

86  
publications  
dans des revues  
à comités de lecture

18  
doctorants

200 docteurs  
et ingénieurs

Un portefeuille  
de 12 brevets

LA RECHERCHE DU RÉSEAU NATIONAL DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE EN 2019, C'EST :

150  
projets de recherche  
dont 74 JRP *(Joint Research Project)*

152  
publications  
dans des revues  
à comités de lecture

325  
communications

50 thèses en cours  
et 1 nouvelle HDR  
*(Habilitation à Diriger les Recherches)*



## LA MISE EN PRATIQUE ET LA DISSÉMINATION DU SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS

## LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE ADOPTE LE NOUVEAU KELVIN

**Dans le cadre du projet InK2, le LNE-Cnam a réalisé un important travail visant à assurer la continuité des mesures de température entre les anciennes et les nouvelles définitions des unités du SI.**

Lors de la refonte du Système international d'unités (SI), en 2018, la définition du kelvin, l'unité de température, a changé. Jusqu'alors, le kelvin était défini comme une fraction de la température du point triple de l'eau, autrement dit à partir d'un artefact matériel. Il est désormais fondé sur la définition microscopique de la température, à savoir la mesure de l'agitation thermique des atomes d'un corps, indépendante de la nature chimique de ses constituants, laquelle est reliée à la température via la constante de Boltzmann  $k$ .

Pour autant, en pratique, scientifiques et industriels mesurent la température à partir de références particulières. Ainsi, l'échelle internationale de température, l'EIT-90, est fondée sur différents points de référence selon la gamme de températures considérée : point triples de divers gaz, point de congélation de métaux... Points entre lesquels on utilise des formules d'interpolation complexes pour couvrir la totalité de l'échelle. Et s'il s'agit de remplacer à terme l'ancien système par le nouveau, il est indispensable que cette transition s'effectue en douceur, aussi bien pour des raisons économiques que pour assurer la pérennité des anciennes mesures. D'où l'important travail des métrologues, depuis plusieurs années, pour établir une correspondance entre les échelles en vigueur et la nouvelle définition thermodynamique de la température.

Pour les chercheurs du LNE-Cnam, cette vaste entreprise, entamée il y a une dizaine d'années, a pris la forme de différents projets européens successifs, dont le deuxième, InK2, s'est terminé l'année dernière. Dans ce cadre, les spécialistes ont développé ou raffiné plusieurs méthodes absolues de mesure de température qu'ils ont appliquées sur tout le domaine de température.

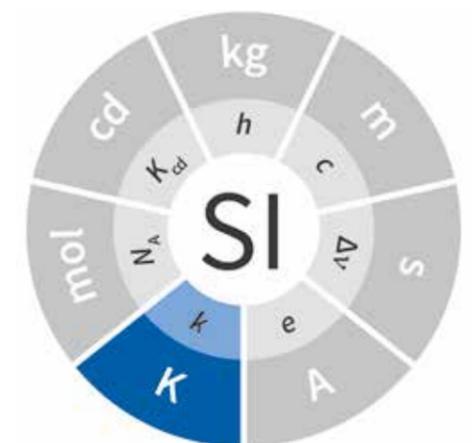
Ainsi, dans la gamme comprise en 5 K et 200 K, leurs mesures sont fondées sur un dispositif de thermométrie acoustique permettant de relier la vitesse du son dans un gaz à la température thermodynamique de ce dernier. On compare alors le résultat obtenu avec celui donné par un thermomètre relié à l'EIT-90. Comme le précise Fernando Sparasci, ingénieur de recherche au LNE-Cnam, «cette expérience, mise en place pour ces comparaisons et la mesure de la constante de Boltzmann, est parvenue à un tel niveau de maturité que nous avons exporté notre dispositif dans sept laboratoires de métrologie à travers le monde, un cas unique.»

En parallèle, les physiciens du LNE-Cnam, en collaboration avec leurs collègues chinois du TIPCCAS (laboratoire de l'académie des sciences), dans le cadre du Laboratoire

Commun de Métrologie Cryogénique créé entre les deux établissements, ont développé une méthode alternative fondée sur la mesure de l'indice de réfraction d'un gaz. Comme l'explique le chercheur, «fort de notre cumul d'expérience, nous avons montré qu'il est possible de réaliser ce type de mesures à l'exactitude requise à une pression unique du gaz, et non pas nécessairement plusieurs comme cela était le cas auparavant.» A la clé : un gain de temps significatif.

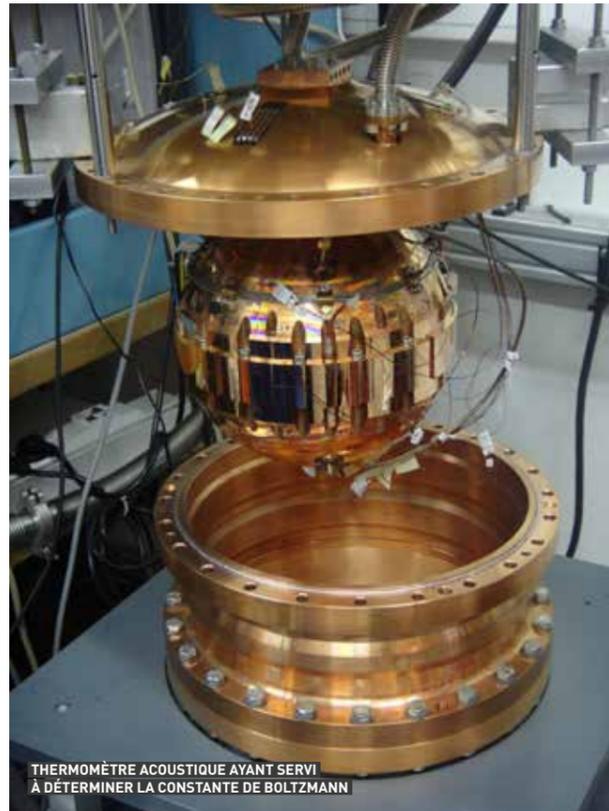
Pour les températures intermédiaires (quelques centaines de degrés Celsius), les scientifiques du LNE-Cnam ont suivi la voie radiométrique, consistant à mesurer la luminance, dans l'infrarouge, de points fixes matérialisés par des métaux placés à leur point de congélation, grandeur reliée à la température via la loi de Planck. Ils ont ainsi déterminé la température thermodynamique de congélation du zinc, de l'aluminium et de l'argent. «Ce résultat est le fruit de 15 ans de travail associant les moyens de référence en radiométrie et en pyrométrie, afin d'établir une chaîne métrologique entre la luminance d'un point fixe traçable au radiomètre cryogénique et la température thermo-dynamique entre 400 °C et 3 000 °C», détaille Mohamed Sadli, au LNE-Cnam.

Par ailleurs, les métrologues ont exploré d'autres méthodes primaires, permettant par exemple de s'abstraire de la référence à un radiomètre absolu.



Ainsi, en collaboration avec le Laboratoire de Physique des Lasers de l'Université Paris 13, ils ont mis au point des moyens de thermométrie par élargissement Doppler adaptée à la gamme de température comprise entre l'ambiante et environ 150 °C. «Le principe consiste à mesurer la température d'un gaz via la largeur de ses raies d'absorption», explique Olga Kozlova. Et pour les températures plus élevées, ils ont développé une instrumentation permettant de mettre en œuvre la méthode de mesure dite de la double longueur d'onde synthétique. Comme l'indique Mohamed Sadli, «simple sur le papier, nous sommes les premiers à en proposer une réalisation de qualité métrologique.»

Enfin, pour adresser les températures les plus basses, comprises entre 10 mK et 1 K, le LNE-Cnam a fait l'acquisition d'un réfrigérateur à dilution «nouvelle génération», dans le cadre d'une action financée par la Région Ile-de-France. Il permettra de réaliser avec une précision accrue l'échelle de température EPBT-2000 (pour les très basses températures) puis, à terme, de la comparer à la nouvelle échelle thermodynamique. D'un mot, les métrologues français se préparent activement à passer à la mise en pratique du nouveau kelvin. ■



THERMOMÈTRE ACOUSTIQUE AYANT SERVI À DÉTERMINER LA CONSTANTE DE BOLZMANN



### LA FRANCE PAYS HÔTE DE TEMPMEKO 2023

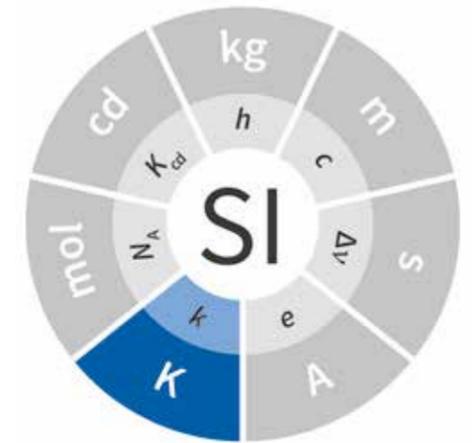
La décision a été prise l'année dernière, et pour la première fois, en 2023, la France accueillera le Congrès TEMPMEKO (15<sup>th</sup> Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science) couplé au congrès ISHM (International Symposium on Humidity and Moisture) consacré à l'humidité. Événement phare de la communauté de la métrologie thermique mondiale, TEMPMEKO réunit tous les trois ans plusieurs centaines de participants autour des problématiques de mesure de température, d'hygrométrie et de propriétés thermiques des matériaux. Comme l'indique Mohamed Sadli, du LNE-Cnam, «alors que la communauté française a obtenu de très bons résultats sur la mesure de la constante de Boltzmann dans le cadre de la révision du Système international d'unités, ainsi que pour la mise en place concrète de la mise-en-pratique de la nouvelle définition du kelvin à haute température, c'est une très belle opportunité pour le LNE et ses partenaires, le Cnam et le CETIAT, que d'organiser cette manifestation.» Cinq ans après l'adoption de la réforme du SI, ce sera l'occasion d'un premier bilan à l'échelle mondiale. ■

« Nous avons montré qu'il est possible de réaliser ce type de mesures à l'exactitude requise à une pression unique du gaz. »

Fernando Sparasci, ingénieur de recherche au LNE-Cnam.

« Nous nous sommes attachés à mieux caractériser les paliers de température par une meilleure compréhension des effets des conditions thermiques. »

Frédéric Bourson, ingénieur de recherche au LNE-Cnam.



## TRÈS HAUTES TEMPÉRATURES : L'ÉCHELLE DE TEMPÉRATURE DE PLUS EN PLUS EXACTE

Plusieurs projets du LNE-Cnam visent à étendre et mieux définir l'échelle internationale de température jusqu'à plusieurs milliers de degrés Celsius. Le développement d'étalons de transfert la rend par ailleurs directement accessible aux industriels.

La dissémination de l'unité de température nécessite la réalisation de points fixes contrôlés et reproductibles qui servent d'étalons. Pour les très hautes températures, ils prennent la forme de petits cylindres en graphite, dans lesquelles un alliage métallique est porté à son point de fusion, et dont une extrapolation peut être faite jusqu'à des températures plus élevées. Depuis de nombreuses années, le LNE-Cnam consacre d'importants travaux à l'amélioration de ces références. 2019 a ainsi vu la réalisation de nouveaux étalons de transfert et le démarrage d'un projet européen visant à consolider et à valider métrologiquement les références aux plus hautes températures.

Plus précisément, depuis 1990, l'échelle internationale de température, l'EIT-90, est définie, pour sa partie haute température, à partir du point de congélation du cuivre, à 1 085 °C. Depuis, pour réduire les incertitudes aux températures encore plus hautes, de nouveaux points fixes ont été développés : Cobalt-carbone à 1 324 °C, platine-carbone à 1 738 °C et rhénium-carbone à 2 474 °C. En parallèle, d'importants travaux ont été menés afin non plus de définir la température de ces points fixes à partir de la température de congélation du cuivre, mais de manière absolue, c'est-à-dire par des méthodes direc-

tement traçables au Système international d'unités. Ainsi, en 2016, le LNE-Cnam et huit autres laboratoires nationaux de métrologie ont déterminé la température dite thermodynamique de ces quatre points fixes.

Dans le but de disséminer ces nouvelles références, les métrologues du LNE-Cnam ont achevé l'année passée la mise au point de cellules réalisant ces points fixes pour qu'ils soient directement utilisables par les industriels pour l'étalonnage de leurs instruments de mesure. «Jusqu'à alors, nos points fixes de référence permettaient d'étalonner un pyromètre de transfert à partir duquel les industriels pouvaient étalonner leurs propres références, explique Frédéric Bourson, au LNE-Cnam. Désormais, nos nouvelles cellules, dont l'ouverture par laquelle est mesuré le rayonnement caractéristique de la température de fusion des alliages a été adaptée aux dimensions des pyromètres de l'industrie, permettent un lien plus direct avec nos références.»

Dans le même temps, 2019 a vu le lancement du projet européen Real-K auquel participe le LNE-Cnam. L'objectif des travaux consacrés aux hautes températures et coordonnés par le LNE-Cnam est de mesurer la température thermodynamique de quatre nouveaux points fixes, notamment le carbure de tungstène-carbone, autour de 2 750 °C. Dans ce but, les scientifiques du LNE-Cnam ont réalisé d'importants développements instrumentaux visant à améliorer les conditions thermiques dans lesquelles les points fixes sont mis en œuvre. «Nous nous sommes attachés à mieux caractériser les paliers de température par une meilleure compréhension des effets des conditions thermiques et notamment des profils de température, explique le physicien. En identifiant ainsi les différentes sources d'incertitudes, nous espérons les réduire d'un facteur deux.»

Par ailleurs, les spécialistes du LNE-Cnam ont achevé la fabrication des cellules qu'ils utiliseront pour le projet Real-K. Ils sont désormais prêts pour une campagne de mesures menée de manière conjointe par une dizaine de laboratoires nationaux en Europe et dans le reste du monde. ■



POINT FIXE À HAUTE TEMPÉRATURE.

## ÉTALONS ÉLECTRIQUES, LES MIRACLES DU GRAPHÈNE À PORTÉE DE MAIN

Grâce à un patient et méticuleux travail de développement expérimental, les chercheurs du LNE progressent dans la mise en œuvre d'un nouvel étalon quantique de résistance.

Les étalons électriques primaires sont aujourd'hui fondés sur des phénomènes quantiques. Ainsi, on obtient l'étalon de résistance par la mise en œuvre de l'effet Hall quantique. Dans un conducteur bidimensionnel placé à très basse température et sous champ magnétique, il se manifeste par un rapport entre la tension transverse et le courant, c'est-à-dire une résistance, variant par sauts discontinus lorsque l'on augmente le champ et prenant des valeurs sous-multiples de  $h/e^2$ , où  $h$  est la constante de Planck et  $e$  la charge électrique élémentaire. Ainsi relié à des constantes fondamentales et indépendant du matériau considéré, l'effet Hall quantique permet d'obtenir un étalon universel et très reproductible.

Aujourd'hui, les métrologues le mettent en œuvre dans des hétérostructures semiconductrices à base d'arséniure de gallium pour réaliser l'ohm avec une incertitude relative de  $10^{-9}$  en routine. Mais cette performance s'obtient au prix de très fortes contraintes opérationnelles. Concrètement, des températures inférieures à 2 K, des champs magnétiques colossaux autour de 10 T et une instrumentation de mesure cryogénique spécifique ultra-sensible utilisant un détecteur supraconducteur.

Au milieu des années 2000, les spécialistes entrevoient le potentiel du graphène, un matériau constitué d'un unique feuillet de carbone aux extraordinaires propriétés de transport électronique, pour, à terme, supplanter l'arséniure de gallium. «*De rapides calculs montrent que l'on peut obtenir une exactitude comparable pour un champ magnétique de seulement 1 T et une température de 4 K*», résume Wilfrid Poirier du LNE. Voire dans des conditions équivalentes potentiellement une exactitude meilleure.

Ainsi, dès 2007, les physiciens du LNE, Wilfrid Poirier et Félicien Schopfer, se lancent-ils dans la mise en place d'une «*filiale graphène*». La première phase consiste à développer des

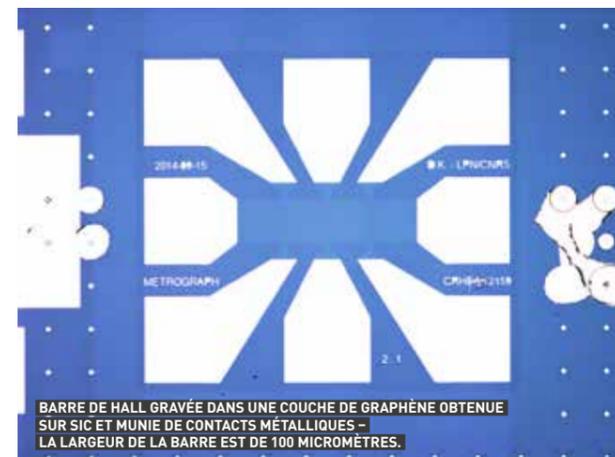
échantillons présentant les propriétés de transport idoines. Ce à quoi ils parviennent finalement, en collaboration avec leurs collègues du C2N et du CRHEA, laboratoires CNRS, qui ont mis au point une technique de fabrication par dépôt chimique en phase vapeur de propane sur carbure de silicium.

Résultat : en 2015, les chercheurs réalisent un étalon quantique de résistance en graphène avec une exactitude de  $1.10^{-9}$  dans des conditions expérimentales très favorables. Comme le souligne les scientifiques, «*nous avons obtenu ce niveau de quantification de la résistance de Hall dès 3,5 T, et à 5 T nous avons montré que l'exactitude à  $10^{-9}$  près persiste jusqu'à 5 K. A plus fort champ magnétique, il est même possible d'augmenter le courant de mesure d'un facteur 10.*»

À la suite de cette première preuve de concept, les métrologues entreprennent un méticuleux travail d'analyse afin de fiabiliser la technologie. «*Il était très important de comprendre la physique sous-tendant les performances remarquables observées, pour améliorer la maîtrise expérimentale et les procédés de fabrication des échantillons*», expliquent les chercheurs.

Un défi en particulier : assurer la stabilité des bonnes propriétés électroniques des échantillons, via une couche de protection adéquate. «*Les polymères que nous utilisons au début ont tendance à se dégrader*», précisent les chercheurs. C'est pourquoi nous cherchons plutôt actuellement à déposer des oxydes, sans pour autant dégrader le graphène.»

Par ailleurs, les chercheurs du LNE s'équipent d'un système cryogénique plus compact et ne consommant plus d'hélium liquide dans le but avoué d'obtenir bientôt un étalon quantique de résistance en graphène à la fois plus pratique et «*moins coûteux*» à mettre en œuvre en routine. À l'évidence, celui-ci est désormais à portée de main. ■



## MÉTROLOGIE DU TEMPS : UNE STATION MULTI-GNSS EST OPÉRATIONNELLE AU LNE-SYRTE

Désormais à l'écoute de quatre constellations de satellites de radionavigation, dont ceux du système européen Galileo, le LNE-SYRTE renforce son offre déjà incontournable en métrologie du temps.

Une nouvelle station multi-GNSS, «*Global Navigation Satellite System*», est opérationnelle au LNE-SYRTE. Installée courant 2018 à l'Observatoire de Paris (OP), elle permet désormais à ce laboratoire pionnier du temps atomique de réaliser des comparaisons d'horloges en utilisant en principe les quatre constellations GNSS que constituent le GPS états-unien, Galileo pour l'Europe, GLONASS, développé par la Russie et le système chinois Beidou, et non plus seulement la première comme depuis plus de trente ans.

Approuvée dès fin 2018, la station avait tout de suite fait face à des problèmes de réception de signaux. Des analyses poussées réalisées l'année passée ont permis d'exclure une cause interne. Ces dysfonctionnements résultaient d'un brouillage mis en place pour les besoins d'une entité tiers dans le voisinage de l'Observatoire, dont la puissance d'émission a finalement pu être limitée fin 2019.

Concrètement, la nouvelle station constitue un nouveau point de référence pour «*l'International GNSS service*» (IGS). A partir de l'observation des GNSS, l'IGS produit des correctifs pour la propagation des signaux des satellites permettant de se raccorder au temps commun de chacun des GNSS. Comme le résume Pierre Urich, au LNE-SYRTE, «*ainsi nous contribuons désormais à la collecte des informations nécessaires à la production de ces correctifs pour les quatre GNSS.*» Et cette contribution a toute son importance dans la mesure où le LNE-SYRTE génère une des meilleures réalisations du Temps universel coordonné UTC(OP). De plus, la nouvelle station

s'ajoute au réseau permanent de l'Institut géographique national (IGN) qui permet d'établir les références géodésiques pour le positionnement au sol.

Au-delà, elle permettra également aux métrologues français de suivre précisément l'évolution du temps commun à tous les satellites de la constellation Galileo, le «*Galileo system time*» (GST). De quoi le diffuser à l'ensemble des utilisateurs comme ils le font déjà pour le «*GPS time*», mais aussi de l'utiliser pour leurs propres comparaisons d'horloges avec d'autres laboratoires de métrologie à travers le monde.

Enfin, depuis une dizaine d'années, en collaboration avec quatre autres laboratoires nationaux européens, le LNE-SYRTE contribue en amont à l'établissement des paramètres de pilotage du GST, ce qui permet aux utilisateurs de Galileo de se raccorder au temps universel. Par ailleurs, le laboratoire français est en charge de l'étalonnage des liens GPS qui permettent de fabriquer ces données. Comme l'indique le physicien, «*jusqu'à maintenant, elles étaient produites par comparaisons d'horloges via des satellites de télécommunication ou bien le GPS. Nous pourrions désormais utiliser également la constellation Galileo.*»

Et Pierre Urich d'ajouter : «*Nos observations de l'année passée montrent que les signaux Galileo sont plus stables et moins bruités que les signaux du GPS. Leur utilisation devrait donc conduire in fine à une amélioration dans la comparaison entre horloges.*» De quoi garantir au LNE-SYRTE de conserver une place de leader en métrologie du temps. ■



## SANTÉ : GARANTIR LA SÉCURITÉ DES CITOYENS

## UNE MÉTROLOGIE POUR LE SUIVI DE NANOPARTICULES DANS LE SYSTÈME DIGESTIF

Dans les produits alimentaires, les nanoparticules de dioxyde de titane, plus connues sous l'appellation E171, sont utilisées comme colorant. De nombreuses études s'intéressent à leur devenir dans l'appareil digestif, en particulier la forme – agglomérée ou non – sous laquelle ces particules se présentent dans les différents fluides du tractus gastro-intestinal.

C'était le but d'un projet de collaboration avec l'Université de Turin en Italie, auquel les chercheurs du LNE ont participé l'année dernière.

Plus précisément, les métrologues français se sont attachés à développer une approche analytique par fractionnement pour mesurer la distribution de taille de nanoparticules dans les fluides gastro-intestinaux. La méthode analytique est fondée sur le fait que des particules de tailles différentes diffusent à des vitesses différentes dans un écoulement laminaire. Le processus de séparation est suivi d'une détection d'absorption et de diffusion de la lumière.

Comme l'explique Enrica Alasonati, au LNE, «cette technique est surtout utilisée pour des particules d'une taille comprise entre quelques nanomètres et plusieurs centaines de nanomètres. Pour les besoins de notre projet, nous avons exploré son pouvoir de séparation pour des particules comprises entre 1 et 20 micromètres.»

Les scientifiques ont réalisé des fluides modèles, représentatifs de la salive et du fluide duodéal, dans lesquels ils ont plongé des nanoparticules de dioxyde de titane. Résultat : dans la salive, elles ont tendance à commencer à s'agglomérer tout en restant à l'échelle nanométrique, alors que dans le fluide duodéal elles forment des particules d'un diamètre moyen supérieur à 5 micromètres. Résultats confortés par l'application d'autres méthodes utilisées par les partenaires italiens du projet.

L'approche testée par le LNE pourrait également trouver des applications pour la mesure de micro-plastiques dans l'eau. ■

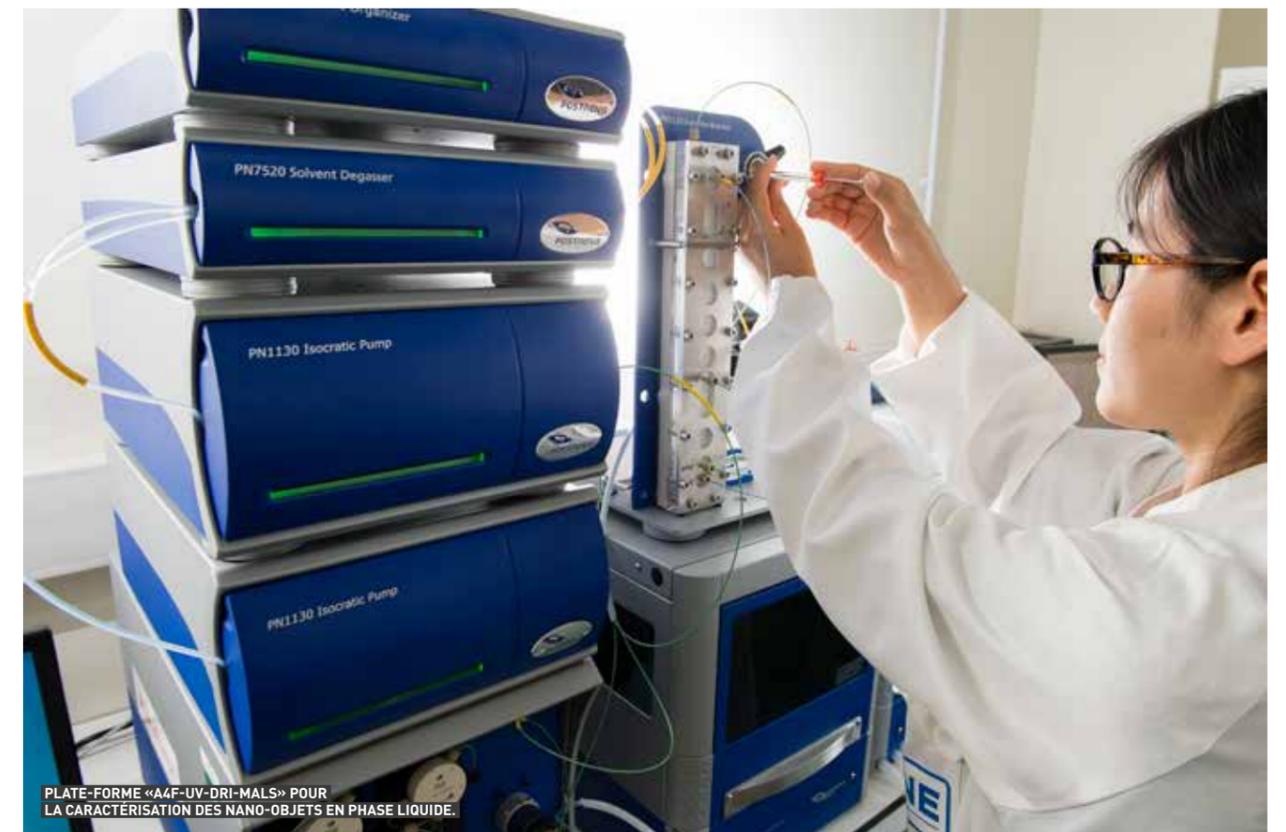


PLATE-FORME «A4F-UV-DR1-MALS» POUR LA CARACTÉRISATION DES NANO-OBJETS EN PHASE LIQUIDE.

## UNE MÉTROLOGIE COMMUNE POUR LE DOSAGE DES HORMONES DANS LES MATRICES BIOLOGIQUES ET ENVIRONNEMENTALES



DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES POUR FIABILISER LES MESURES DE BIOMARQUEURS ET DE POLLUANTS.

La problématique de la perturbation endocrinienne est au cœur des préoccupations citoyennes et une priorité de santé publique et environnementale. Pour répondre aux nombreuses questions de recherche qui y sont liées, le LNE conduit actuellement un projet de définition d'un cadre métrologique pour fiabiliser le dosage d'hormones et substances apparentées dans le sérum humain, d'une part, et les matrices aqueuses, d'autre part.

## INCINÉRATION DES DÉCHETS : LA TOXICITÉ DES NANO-COMPOSITES PASSÉE À LA LOUPE

Le cycle de vie de nombreux nanocomposites s'achève par une étape d'incinération. Au cours de ce traitement, les nanoparticules que contiennent ces matériaux voient leurs propriétés modifiées radicalement, d'où peuvent résulter des problématiques de toxicité potentielle des résidus. Ainsi, le projet NanoDeTox, financé par l'ADEME, piloté par l'IMT Mines Alès et auquel participent l'IMT Mines Saint-Etienne et le LNE, vise à évaluer précisément la toxicité des sous-produits issus de l'incinération de nanocomposites utilisés dans les domaines de la câblerie et de l'automobile.

Pour les spécialistes du LNE, tout l'enjeu consiste à documenter aussi précisément que possible l'ensemble des transformations subies par les nanoparticules au terme d'un processus d'incinération défini au laboratoire. Pour ce faire, ils

Dans un cas, il s'agit de pouvoir doser des molécules à visée de diagnostic ; dans l'autre, de mesurer la contamination des eaux, mais la problématique demeure la même : assurer la qualité et la comparabilité des mesures à des concentrations très faibles. «*En santé, on observe actuellement des variations pouvant atteindre 40 % d'une méthode à l'autre, ce qui est peu compatible avec les besoins des médecins*», précise Amandine Bœuf, au LNE. «*Et dans le domaine environnemental, les concentrations cibles sont souvent sous les seuils de détection des méthodes mises en œuvre dans la surveillance, ce qui pose problème pour évaluer les risques*», complète Sophie Lardy-Fontan, sa collègue.

Ainsi, l'objectif des deux chercheuses et de leur doctorante, Elodie Mirmont, est de parvenir à doser 23 molécules ciblées à des proportions infimes dans ces matrices. A ce jour, des méthodes basées sur la dilution isotopique associée à la spectrométrie de masse - méthode de référence en métrologie chimique - ont été développées et sont en cours de validation. En environnement, elles vont être appliquées à une étude de surveillance des milieux aquatiques. En santé, les développements sont en cours de finalisation et devraient permettre à terme la production de matériaux de référence pour l'étalonnage d'appareils de mesure en routine. ■

utilisent la plateforme CARMEN qui permet de caractériser huit paramètres définis par l'ISO TR/13014, relative à la caractérisation des nano-objets manufacturés soumis aux essais toxicologiques. En parallèle, des biologistes évaluent la toxicité in vitro de ces nano-résidus sur une lignée de macrophages. Objectif : corrélés leurs propriétés physico-chimiques et dimensionnelles avec leur impact sanitaire, effets mélanges additifs ou antagonistes compris.

«*Démarré début 2019, NanoDeTox vise à établir des recommandations pour limiter les risques associés aux résidus solides d'incinération de nanocomposites, notamment dans la perspective d'une démarche environnementale de type safer-by-design*», précise Carine Chivas-Joly, au LNE. Résultats attendus dans le courant de l'année prochaine ! ■

## LE LNE-LNHB ACCOMPAGNE LE DÉPLOIEMENT DE LA RADIOTHÉRAPIE SOUS IRM

Des appareils de radiothérapie équipés d'un système d'imagerie par résonance magnétique (IRM) sont en cours de déploiement en France et en Europe. Contrairement aux appareils de la génération précédente, à imageur X, ils permettent un meilleur contraste des tissus mous des patients et suppriment le supplément de dose dû au scanner. Cependant, le fort champ magnétique nécessaire à la mise en œuvre de l'IRM n'est pas sans effet sur les faisceaux, ni sur les instruments de mesure. La traçabilité dosimétrique correspondante est manquante ainsi que les codes de pratique pour la dosimétrie de référence et la caractérisation des champs de rayonnement. Pour contribuer au développement d'étalons primaire et de transfert de mesure de dose absorbée dans l'eau adaptés, le LNE-LNHB conduit depuis l'année dernière un projet en trois volets.

Ainsi, en 2019, une collaboration a été mise en place entre les métrologues et les praticiens de l'Institut Paoli Calmette, à

Marseille pour bénéficier du faisceau de leur nouvelle machine ViewRay MRIdian. Un premier volet du projet consiste à vérifier la compatibilité des mesures de dose absorbée avec et sans champ magnétique à l'aide de dosimètres à l'alanine supposés insensibles au champ magnétique, et en fonction des «facteurs d'ouverture collimateur» de leur installation (relatifs à la variation de la dose délivrée en fonction de la collimation du faisceau). Un deuxième volet consiste à développer une méthode de dosimétrie par gel pour effectuer des mesures fiables en 3D de la dose délivrée par les faisceaux. Enfin, dans un troisième volet, le LNE-LNHB va concevoir un nouveau calorimètre graphite amagnétique permettant d'effectuer des mesures de dose absorbée dans l'eau au niveau primaire pour ce type de faisceau. Au terme du projet, en 2022, il pourra être utilisé pour étalonner les dosimètres de radiothérapie de référence in situ. ■

## VÉRIFICATION DES ÉTHYLOTESTS ET DES ÉTHYLOMÈTRES : EN ROUTE VERS UNE MÉTROLOGIE EUROPÉENNE HARMONISÉE

Depuis le début des années 2000, l'utilisation de solutions hydro-alcooliques comme matériaux de référence certifiés pour la vérification des éthylotests et éthylomètres s'est généralisée sous l'effet du renforcement des lois sur la conduite sous l'emprise de l'alcool. Pour autant, jusqu'à aujourd'hui, seuls le LNE et son homologue allemand, le BAM, sont accrédités pour la production et la certification de telles solutions. D'où le projet européen Alcoref, actuellement en cours, qui vise à ce que ces deux laboratoires transmettent leurs connaissances en la matière à huit autres laboratoires nationaux de métrologie en Europe.

Comme l'explique Béatrice Lalère, du LNE, «*depuis au moins une dizaine d'années, nos homologues allemands et nous-mêmes avons développé un important savoir-faire pour la production et la certification de ces solutions. L'enjeu d'Alcoref est donc de transmettre notre savoir-faire et nos protocoles à nos partenaires pour une métrologie harmonisée au niveau européen.*»

Ainsi, après un démarrage du projet en 2017, l'année passée a vu se finaliser la formation des métrologues des différents pays participants. Désormais, deux essais inter-laboratoires sont en cours. Il s'agit d'une part de tester la capacité des différents laboratoires impliqués à doser leurs solutions avec la

plus faible incertitude possible. D'autre part, le LNE a la charge d'une inter-comparaison visant à s'assurer que les différents matériaux produits sont bien équivalents.

De quoi rendre incontestable tout contrôle d'alcoolémie d'un bout à l'autre de l'Europe. ■



BANC D'ÉTHYLOMÉTRIE.



IMPLANT ORBITAL RÉALISÉ PAR FABRICATION ADDITIVE.

## IMPLANTS MÉDICAUX 3D, LEUR FIABILITÉ MÉTROLOGIQUE AUGMENTÉE

Afin d'augmenter l'acceptation de la fabrication additive dans l'univers médical, un projet européen a validé la chaîne de fabrication des implants et guides médicaux, et qualifié des moyens de contrôle de leur qualité.

La fabrication additive, dite impression 3D, permet la fabrication de pièces par ajout de matière couche par couche. Elle offre ainsi la possibilité de réalisation d'une grande complexité incluant des cavités ou des motifs en treillis impossibles à obtenir par d'autres techniques. Elle est ainsi très prometteuse pour la fabrication d'implants et de guides médicaux. Pour autant, une diffusion large de la fabrication additive dans l'univers médical ne sera possible qu'à la condition de voir cette technique fiabilisée d'un point de vue métrologique. C'était l'objet des dix-huit partenaires industriels et académiques rassemblés autour du LNE dans le projet européen MetAMMI qui s'est achevé l'an dernier.

Une question clé concerne le contrôle de la qualité des pièces obtenues par impression 3D. Produites en série de quelques dizaines à quelques centaines, il est en effet impossible de les examiner une à une par les méthodes tomographiques, lourdes et coûteuses, qui sont la référence en la matière.

Pour un contrôle de routine, les scientifiques se sont donc attachés à examiner et à qualifier différentes techniques alternatives. De leur côté, les métrologues du LNE ont concentré leurs efforts sur la méthode dite de résonance acoustique. Elle consiste à mettre en vibration la pièce mécanique par un choc mécanique et à enregistrer sa réponse acoustique, caractéristique de ses propriétés. Ainsi, si la pièce présente des défauts, ses fréquences de résonances différeront de celle d'une pièce conforme.

Une telle méthode ne fournit évidemment pas autant d'informations que les méthodes d'imagerie. En revanche, « elle peut être mise en œuvre facilement sur un grand nombre de pièces dont on peut ensuite comparer les réponses par des méthodes statistiques afin d'identifier d'éventuelles pièces défectueuses », explique Anne-Françoise Obaton, au LNE. Si nécessaire, il est alors possible de pousser plus loin les investigations par d'autres techniques.

Pour ce faire, la méthode de prédilection demeure la tomographie X, tel que l'ont montré les chercheurs en menant une comparaison avec d'autres méthodes tomographiques, en particulier la tomographie térahertz dont la résolution est moins bonne. A la suite de quoi, ils ont rédigé des protocoles pour une bonne application de ces différentes méthodes en fonction des objectifs de précision et de caractérisation poursuivis.

Au-delà, le consortium a également conduit une analyse complète des erreurs qui s'additionnent le long de la chaîne allant du scanne de patient au contrôle de l'implant, en passant par toutes ses étapes d'élaboration et de fabrication. De quoi proposer une série de recommandations pour les réduire, notamment lors de l'utilisation de scanners médicaux X. Et plus largement de favoriser l'acceptation d'une technologie à l'extraordinaire potentiel médical. ■

## MIEUX DIAGNOSTIQUER LA MALADIE D'ALZHEIMER GRÂCE À LA PROTÉINE TAU

Avec 860 000 personnes âgées de plus de 65 ans atteintes (selon l'OPEPS, Office parlementaire d'évaluation des politiques de santé), la maladie d'Alzheimer est au premier rang des maladies neurodégénératives en France, et constitue un enjeu de santé publique majeur. Dans de nombreux cas, le diagnostic est trop tardif et les techniques actuelles manquent encore de fiabilité, ce qui compromet la prise en charge des patients et l'évaluation de nouvelles stratégies thérapeutiques.

Actuellement, le dosage de biomarqueurs présents dans le liquide céphalorachidien, comme la protéine Tau, est un

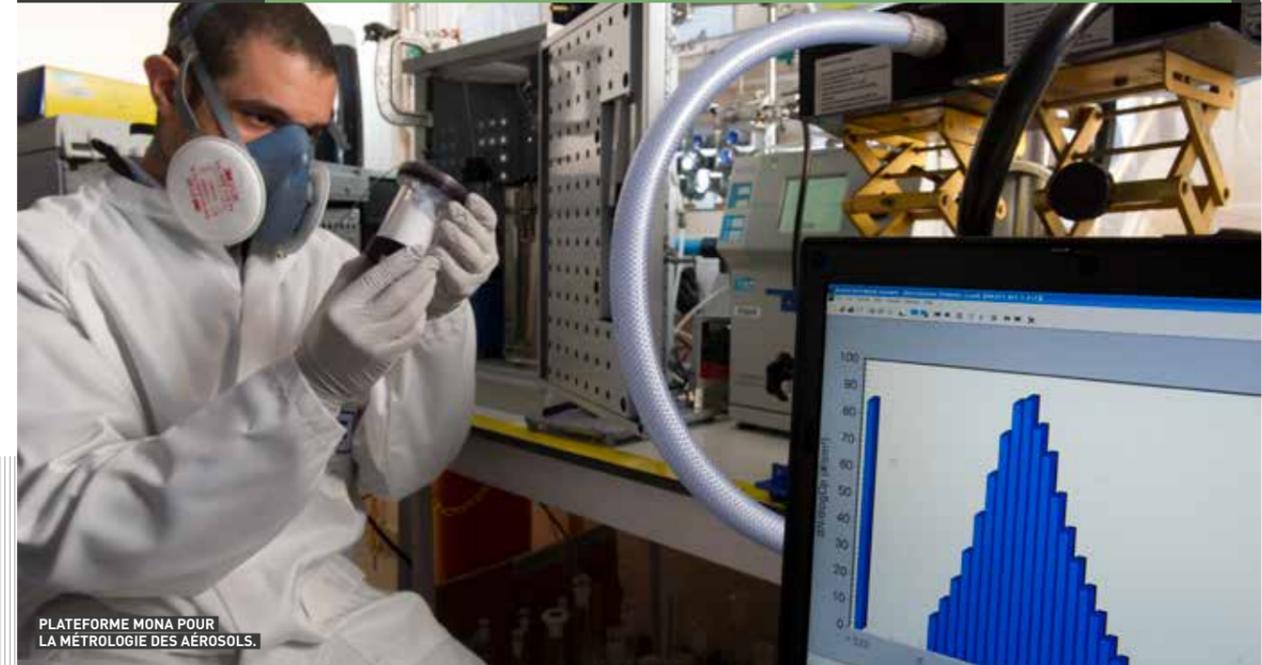
bon indicateur précoce de l'apparition et de l'évolution de la maladie d'Alzheimer. Les chercheurs du LNE travaillent ainsi au développement de méthodes de dosage de cette protéine afin d'assurer une plus grande comparabilité des mesures des laboratoires d'analyse, rendant les analyses donc plus fiables pour les médecins.

Dans le cadre de ces travaux, Vincent Delatour, expert en biomarqueurs au LNE, et ses collègues ont reçu un financement de la part de l'association France Alzheimer pour leurs recherches menées sur la protéine Tau en lien avec le CHU de Montpellier. ■





# ENVIRONNEMENT ET ÉNERGIE : CONTRIBUER À UN MONDE DURABLE



PLATEFORME MONA POUR LA MÉTROLOGIE DES AÉROSOLS.

## AEROMET : LA QUALITÉ DE L'AIR À LA LOUPE

Le projet européen AEROMET mené dans le cadre d'EURAMET développe des protocoles améliorés pour la caractérisation des aérosols atmosphériques.

La mesure de la qualité de l'air, en particulier au travers de celle des particules solides ou liquides présentes dans l'air ambiant - les aérosols - est une importante problématique de santé publique. Aujourd'hui, la réglementation concerne la mesure de concentration en masse qui n'apparaît néanmoins pas suffisante pour caractériser ces aérosols. Elle sous-estime en effet la contribution des plus petites particules dont la masse est moins importante que celle des plus grosses. La mesure de concentration en nombre apparaît donc bien plus adaptée pour la quantification des particules fines et ultrafines. Mais pour faire face aux impacts sanitaires, il s'agit d'une part d'accroître la traçabilité et la justesse de ces mesures ; d'autre part de développer des protocoles harmonisés pour les mesures de concentration en nombre mais aussi de distribution granulométrique (en masse et en nombre) de ces aérosols et de leur composition chimique. C'est tout l'enjeu du projet européen AEROMET, dont les développements ont été achevés l'année passée, et auquel les spécialistes du LNE ont participé selon trois axes.

Ainsi, les métrologues français ont participé au développement d'une chambre de simulation contenant un aérosol modèle représentatif de l'air ambiant. L'objectif : proposer l'étalonnage en laboratoire d'instruments automatiques de mesure d'aérosols dans des conditions expérimentales contrôlées et reproductibles.

Comme l'explique François Gaie-Levrel, «on assiste en particulier au développement de capteurs fondés sur une mesure en nombre de particules, à partir de laquelle il est non trivial de calculer des concentrations massiques d'aérosols. Ainsi ce

dispositif pourra contribuer à l'étalonnage de tels capteurs.» Par ailleurs, les scientifiques du LNE ont mis au point des protocoles validés et traçables pour le développement de nouveaux matériaux de référence certifiés (MRC) dédiés à la caractérisation de la composition chimique élémentaire des particules, tels les métaux. Concrètement, ceux-ci prennent la forme de filtres de référence dont les fractions particulaires PM10 et PM2,5 prélevées ont été caractérisées métrologiquement par spectrométrie de masse (ICP-MS). «Il est alors possible d'utiliser ces MRC pour assurer la traçabilité métrologique des analyses de métaux réglementés en phase particulaire dans l'air ambiant», complète le physico-chimiste.

« on assiste en particulier au développement de capteurs fondés sur une mesure en nombre de particules. »

François Gaie-Levrel, Docteur ingénieur en métrologie des aérosols.

Enfin, les chercheurs ont participé à l'élaboration de procédures pour étalonner des spectromètres de mobilité électrique (SMPS) utilisés pour la mesure des distributions granulométriques en nombre d'aérosols, de même que des compteurs de particules à condensation (CPC) qui servent pour la mesure de concentration totale particulaire en nombre. Dans ce cadre, une comparaison inter-laboratoires mettant en œuvre différents instruments a été menée par les partenaires impliqués dans le projet, de quoi permettre une mise en cohérence des mesures au niveau européen. «Ces mesures devront être intégrées à la réglementation dans un futur proche afin de surveiller les particules ultrafines dans l'air ambiant», explicite François Gaie-Levrel.

Fort du succès du projet dans son ensemble, un projet AEROMET 2 a débuté cette année. De quoi poursuivre la mise en phase de la métrologie de la qualité de l'air avec les exigences sociétales. ■

## MESURES D'AMMONIAC DANS L'AIR : VERS UN ÉTALONNAGE AUX FRACTIONS MOLAIRES LES PLUS BASSES

L'ammoniac atmosphérique d'origine agricole a des effets nuisibles sur la santé humaine et les écosystèmes. Actuellement, on en évalue les fractions molaires par des techniques spectroscopiques. Mais leur traçabilité est mal assurée du fait de l'impossibilité de réaliser des mélanges de gaz stables pour l'étalonnage des instruments de mesure dans la gamme de fractions molaires d'intérêt, soit entre quelques nanomoles et quelques centaines de nanomoles par mole. D'où le projet actuellement en cours au LNE de développement d'un banc pour l'étalonnage dynamique de ces instruments. Précisément, ce dispositif repose sur le procédé dit de perméation. Il prend la forme d'un tube régulé en température d'où s'échappe en continu de l'ammoniac au travers d'une membrane perméable, avant d'être dilué dans un flux d'air balayant l'enceinte où est placé le tube.

Outre le développement de l'étalon de référence, comprenant en particulier la mise au point d'un système pour prélever une partie du mélange gazeux généré afin de le diluer une seconde fois, les scientifiques ont accompli un important travail de développement du logiciel. «*Ce dernier assure la régulation de l'ensemble et permet de réaliser un étalonnage de façon automatique tout en évaluant les incertitudes sur la base de mesures de débits et de températures*», explique Christophe Sutour, au LNE.

Aujourd'hui, le dispositif fonctionne et a été validé. D'ici la fin de l'année, les métrologues optimiseront les paramètres d'étalonnage et conduiront des mesures d'impuretés afin d'accroître la justesse de leurs mesures. Leur banc sera alors mis en service, apportant un gain notable pour un étalonnage aux plus basses fractions molaires. ■

## UN BANC POUR ÉVALUER LES PERFORMANCES DES SYSTÈMES DE CAPTEURS DE POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Portables et faciles à mettre en œuvre, les systèmes de capteurs de pollution atmosphérique sont déployés dans de nombreux domaines (environnement, agroalimentaire...). Basés sur un large spectre de techniques de mesures (électrochimique, optique, infrarouge...), ils permettent de mesurer les concentrations atmosphériques particulières et gazeuses en temps réel avec une résolution spatio-temporelle élevée.

Cependant, de nombreux questionnements apparaissent autour de la justesse, de la sélectivité vis-à-vis du composé considéré et de la fiabilité des mesures associées, en lien avec des variations de facteurs environnementaux (température, humidité, interférents chimiques...), et un manque en termes de données d'évaluation est à déplorer.

Dans ce cadre, le LNE développe un banc instrumenté dédié à l'évaluation des performances de ces capteurs. «*Celui-ci est composé d'une chambre d'exposition qui permet de soumettre des systèmes de capteurs à des atmosphères gazeuses ou à des aérosols dont la concentration est contrôlée ainsi que la température et l'hygrométrie*, explique Tatiana Macé, au LNE. *L'évaluation des systèmes de capteurs est alors réalisée par comparaison avec des instruments de référence couplés à la chambre d'exposition.*»

Initié en 2018, le projet a vu l'année passée consacrée à la mise en place du banc instrumenté. Reste aux métrologues à le caractériser en humidité et température et à s'assurer de l'homogénéité des conditions au sein de la chambre d'exposition. Fin 2020, il sera alors mis à disposition des fabricants et des utilisateurs qui, dans un contexte réglementaire de plus en plus strict, pourront évaluer les performances métrologiques de leurs capteurs, telles que leur justesse, leur linéarité et leur reproductibilité. ■



## MÉTROLOGIE DES IMPULSIONS HAUTES TENSIONS : UNE OFFRE RENOUVELÉE

**Foudre, ondes de manœuvre, génération de rayons X, les installations du LNE couvrent désormais toute la palette des besoins en matière d'étalonnage et de références métrologiques.**



LABORATOIRE DE MÉTROLOGIE ÉLECTRIQUE  
HAUTE TENSION DU LNE.

accrues sur la mesure de la valeur maximale de la décharge, une meilleure estimation de ses paramètres temporels tout en prenant en compte les oscillations électriques qui se manifestent parfois lors d'une brutale montée en tension. Ainsi, pour en tenir compte, les spécialistes du LNE ont en particulier mis à jour et validé d'un point de vue métrologique des nouvelles stations d'acquisition et des algorithmes de traitement plus performants.

En parallèle, les scientifiques ont mis au point une nouvelle installation de référence pour la mesure des ondes dites de manœuvre qui apparaissent dans un disjoncteur lors de son ouverture. Plus longue qu'une décharge de foudre, ces impulsions électriques, dont la montée dure entre 20 et 300 microsecondes et la descente entre 1 ms et 4 ms, transportent une importante quantité d'énergie qui peut facilement mettre à mal les matériels. «*Concrètement, nous avons fait l'acquisition d'un diviseur capacitif commercial et réalisé tous les développements nécessaires pour l'intégrer dans une chaîne métrologique complète*», détaille Mohamed Agazar, au LNE. Un projet d'une comparaison inter-laboratoires au niveau international est par ailleurs à l'étude afin de garantir sa traçabilité au meilleur niveau.

Enfin, à la suite de discussions avec des spécialistes du CEA-Saclay, les métrologues ont proposé un dispositif transportable pour l'étalonnage en impulsion des appareils utilisés pour la synthèse des rayons X d'intérêt médical, en collaboration avec General Electric et quatre laboratoires de métrologie européens. Ces appareils sont en effet aujourd'hui étalonnés à partir d'une tension continue, alors qu'ils sont ensuite utilisés pour mesurer de brèves impulsions, d'où un risque d'erreur. «*Partant d'un cadre réglementaire totalement vierge, nous avons montré que la méthode utilisée aujourd'hui est fiable pour des impulsions d'une durée supérieure à une milliseconde, ce qui est compatible avec les applications médicales actuelles*, explique le chercheur. *Mais les besoins évoluent vers des impulsions plus rapides, d'où l'intérêt des industriels pour notre projet.*»

Ainsi prêt à devancer la demande, le LNE a enfin lancé cette année un projet sur les impulsions nanosecondes, notamment d'intérêt militaire. Alors qu'en la matière toute la métrologie reste à développer, le laboratoire français se place d'ores et déjà aux avant-postes. ■

«*Nous avons montré que la méthode utilisée aujourd'hui est fiable pour des impulsions d'une durée supérieure à une milliseconde, ce qui est compatible avec les applications médicales actuelles.*»

Mohamed Agazar, Ingénieur chercheur, responsable activités Haute Tension.

Nouvelles normes réglementaires ou besoins accrus des laboratoires et des industriels, la métrologie des impulsions à haute tension, qu'elle concerne la foudre, les nouveaux réseaux intelligents ou encore la médecine, se doit de répondre à des exigences nouvelles. Ainsi, au terme d'un projet de trois ans, le LNE renforce les performances de ses installations existantes, élargit son offre en matière de références et devance les futurs besoins des utilisateurs.

Première cible des spécialistes des hautes tensions, la foudre, contre laquelle les métrologues doivent pouvoir garantir le bon fonctionnement des installations et matériels électriques. Pour ce faire, ceux-ci sont mis à l'épreuve lors de tests où l'on simule l'effet d'un impact avant d'en mesurer les effets à l'aide d'un diviseur de tension qui se doit d'être étalonné.

Dans ce but, le LNE dispose d'une installation de référence dont la réglementation impose désormais des exigences

## LES INFRASONS DÉSORMAIS DANS LE GIRON DU SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS

La surveillance du respect du traité d'interdiction des essais nucléaires se fonde notamment sur la mesure des infrasons engendrés par une explosion. Afin de conférer à ces mesures une valeur juridique incontestable, il est nécessaire d'accroître leur traçabilité au Système international d'unités, ce à quoi travaillent actuellement les chercheurs du LNE en collaboration avec le CEA.

Concrètement, il s'agit de pouvoir étalonner des capteurs à des fréquences acoustiques inférieures à 20 Hz, quand la méthode classique actuellement utilisée, dite de la réciprocité, achoppe pour des raisons instrumentales et de modélisation. Les métrologues ont ainsi développé un banc d'étalonnage primaire reposant sur le principe dit du pistonphone laser. Comme l'explique Dominique Rodrigues, du LNE «sa mise en œuvre consiste à placer le capteur acoustique à étalonner dans une cavité close muni d'un piston générant

*une pression acoustique infrasonore. Cette pression est déterminée via la connaissance du débit volumique du piston mesurée par interférométrie laser et celle de l'impédance acoustique de la cavité déterminée par modélisation. La sensibilité du capteur est alors donnée par le rapport de sa tension de sortie et de la pression acoustique à laquelle il est soumis.*»

En pratique, les scientifiques ont réalisé une modélisation de leur cavité acoustique en prenant notamment en compte les effets d'échanges thermiques dans l'air, cruciaux aux basses fréquences. L'année dernière, ils ont par ailleurs achevé l'intégration de leur installation qui est actuellement en cours de validation. Elle permettra bientôt un étalonnage traçable au SI pour les fréquences inférieures à 2 Hz, ce que seul le LNE est désormais en mesure de faire. ■

## UN SYSTÈME NUMÉRIQUE POUR RÉDUIRE LE BRUIT DE FOND EN SPECTROSCOPIE GAMMA

Pour mesurer les très faibles activités radiologiques, il convient de protéger les instruments de mesures contre les signaux parasites. Ainsi, les spécialistes du LNE-LNHB placent leurs détecteurs au germanium, utilisés en spectroscopie gamma, et les échantillons qu'ils analysent dans une enceinte de plomb et de cuivre. Mieux, ces enceintes sont munies sur leur face externe de détecteurs qui, si ils détectent un événement mis en corrélation avec un autre enregistré par le détecteur interne, permettent d'indiquer que l'on fait face à un «bruit» venant de l'extérieur et non pas un signal issu de l'échantillon. On parle alors de blindage actif.

Afin de diminuer le niveau de bruit de leur installation, les métrologues conduisent actuellement un projet de refonte complète de leur système d'acquisition. Comme l'explique Christophe Bobin, du LNE-LNHB, «notre instrumentation analogique actuelle, non développée spécifiquement pour

*nos besoins, ne permet pas une bonne estimation des temps morts durant lesquels l'électronique cesse l'acquisition du signal en cas de détection de signaux parasites, d'où il résulte une incertitude sur les activités mesurées.*»

Ainsi, les physiciens ont développé un boîtier électronique numérique programmable intégrant sur un seul composant l'ensemble des fonctionnalités nécessaires au traitement. Un tel système, issue de la métrologie primaire, permet un traitement plus cohérent des temps morts, donc du temps total d'acquisition et par conséquent du rapport signal sur bruit.

Le système a été validé l'année passée et les spécialistes s'attendent à une réduction du bruit de fond d'un facteur allant de deux à cinq. D'autres améliorations seront par ailleurs apportées en 2020, avant une mise en œuvre pour les utilisateurs. ■

## CHAMPS DE RÉFÉRENCE NEUTRONIQUES : LA PRÉCISION À BASSE ÉNERGIE EN LIGNE DE MIRE

Les références françaises des unités liées à la dosimétrie des neutrons reposent sur la production de différents champs neutroniques, dont les champs mono-énergétiques produits entre 2 keV et 20 MeV par l'installation AMANDE, de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). Cependant, il n'existait pas jusqu'à maintenant de protocole permettant de mesurer de manière directe l'énergie de neutrons en dessous de 1 MeV. Ce à quoi le LNE-IRSN, laboratoire associé au LNE, est en train de remédier.

L'énergie des neutrons est déterminée par la méthode dite du temps de vol. Elle consiste à détecter les particules en deux points séparés par une distance connue, ce qui permet de déduire leur vitesse et donc leur énergie. Cependant, en pratique, aucun détecteur ne permettait de couvrir l'ensemble du domaine en énergie avec les performances requises, notamment au niveau du temps de réponse. Les scintillateurs dits «Stilbène», avec un temps de réponse de l'ordre de la nanoseconde,

ouvrent de nouvelles perspectives dont les scientifiques du LNE-IRSN à Cadarache entendent tirer parti. Ainsi, dans le cadre d'un projet démarré fin 2018, «nous avons montré que ces détecteurs sont suffisamment sensibles et possèdent des capacités exceptionnelles de séparation des neutrons et des photons qui leur permettent de descendre jusqu'à des énergies de l'ordre de 0,1 MeV. En parallèle, l'acquisition des données a été numérisée ce qui ouvre la perspective de performances métrologiques accrues avec plus de robustesse et de simplicité d'utilisation», expose Michaël Petit, au LNE-IRSN.

Dans le courant de l'année, les scientifiques français poursuivront leur travail pour étendre le domaine en énergie d'utilisation de la méthode du temps de vol et améliorer les incertitudes associées. De quoi ensuite offrir à la communauté neutronique française des références en énergie des neutrons entre quelques keV et 20 MeV avec une incertitude de l'ordre de 1%. ■

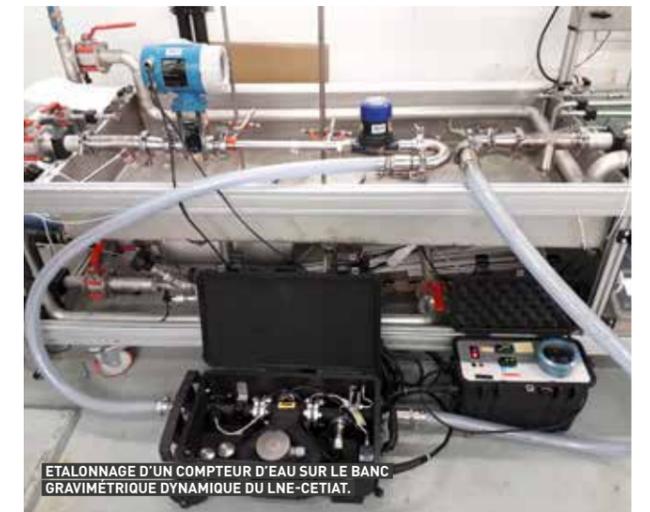
## COMPTEURS D'EAU : UN PROTOCOLE D'ÉTALONNAGE ENFIN RÉALISTE

Chasse d'eau, ouverture ou fermeture d'un robinet... la consommation d'eau d'un ménage est un phénomène extrêmement fluctuant. Or, la certification métrologique des compteurs d'eau domestiques est actuellement réalisée à débit constant, d'où il résulte un étalonnage peu fiable. Pour y remédier, plusieurs laboratoires européens, dont le LNE-CETIAT, participent depuis 2018 à un projet européen visant à développer des méthodes d'étalonnage dans des conditions réalistes, autrement dit dynamiques.

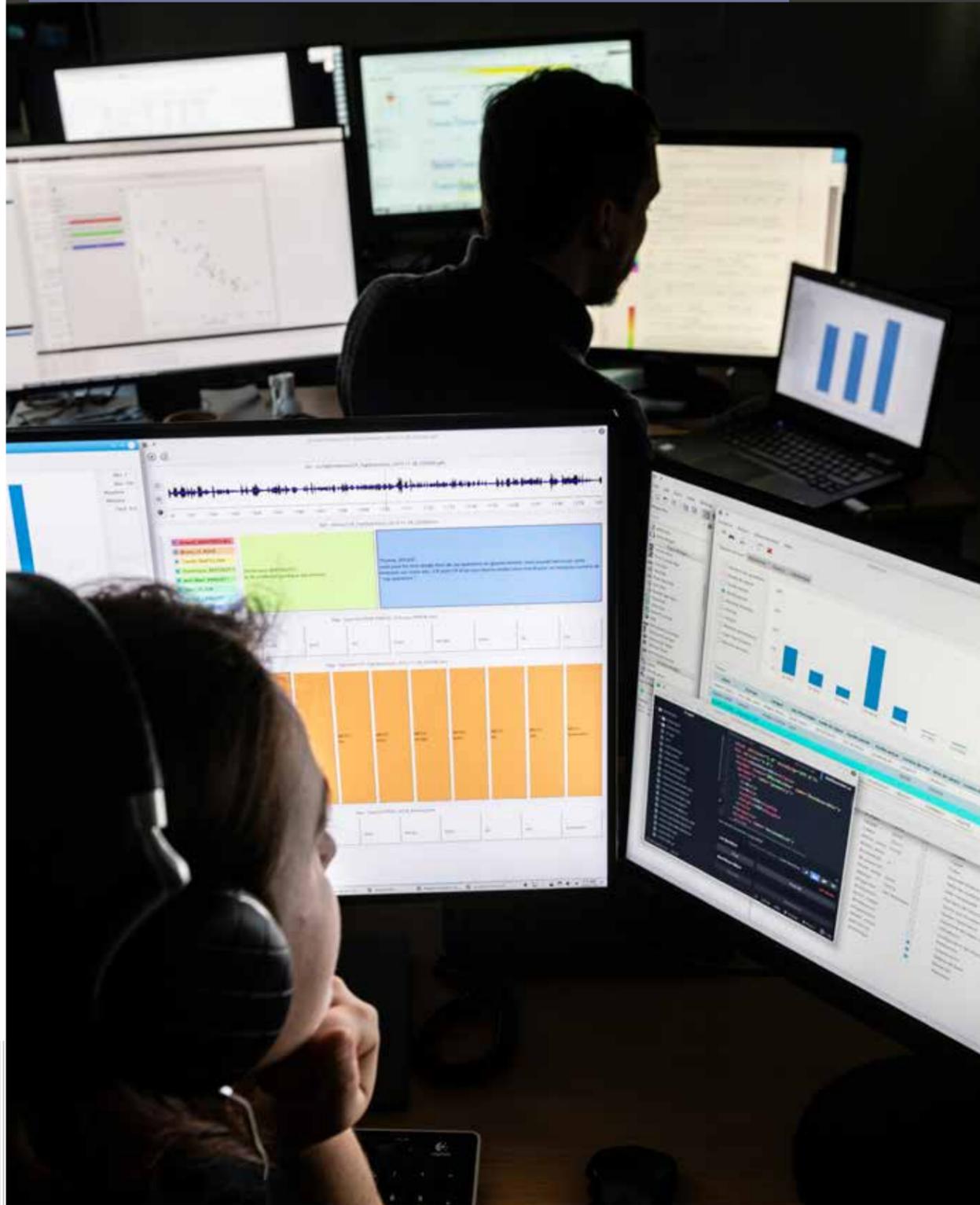
Dans cette perspective, les partenaires ont d'abord établi un profil de consommation type qui pourra être utilisé pour les certifications. Par ailleurs, le projet vise à développer, dans chaque laboratoire national participant, un banc d'étalonnage dynamique de référence. En France, au laboratoire, les métrologues ont ainsi opté pour une méthode dite gravimétrique. Elle consiste à déterminer un débit en mesurant le temps nécessaire pour remplir un récipient dont on mesure en simultanément l'évolution de la masse. Comme l'explique Florestan Ogheard, au LNE-CETIAT, «pour s'adapter à un profil fluctuant, l'essentiel de notre travail a porté sur le développement de méthodes de mesure "temps réel"».

L'année passée, les métrologues français ont également sélectionné un débitmètre dit à effet Coriolis qui servira courant 2020 pour une inter-comparaison entre les laboratoires

impliqués dans le projet. Enfin, le LNE-CETIAT a organisé en novembre dernier un workshop qui a réuni, outre les participants au projet, plusieurs industriels, signe que le transfert de la nouvelle méthodologie vers les fabricants est amorcé. ■



ÉTALONNAGE D'UN COMPTEUR D'EAU SUR LE BANC GRAVIMÉTRIQUE DYNAMIQUE DU LNE-CETIAT.



# INDUSTRIE : ACCOMPAGNER L'INNOVATION

## LA MÉTROLOGIE DE L'APPARENCE SUR LA VOIE DE LA MATURITÉ

Le LNE-LCM coordonne actuellement deux projets européens qui visent à établir des bases métrologiques solides pour mesurer l'apparence d'un objet.

Brillance, iridescence, scintillement... à l'interface de la mesure et de la sensation, la métrologie de l'apparence est en plein essor. Posant d'importantes questions scientifiques fondamentales, son développement répond par ailleurs à une demande économique forte tant l'apparence d'un objet est aujourd'hui au cœur de ce qui détermine l'acte d'acheter. En pointe sur le sujet, le LNE-LCM a poursuivi l'année passée la conduite des deux projets européens, BIRD et BxDiff, dont il est le coordinateur.

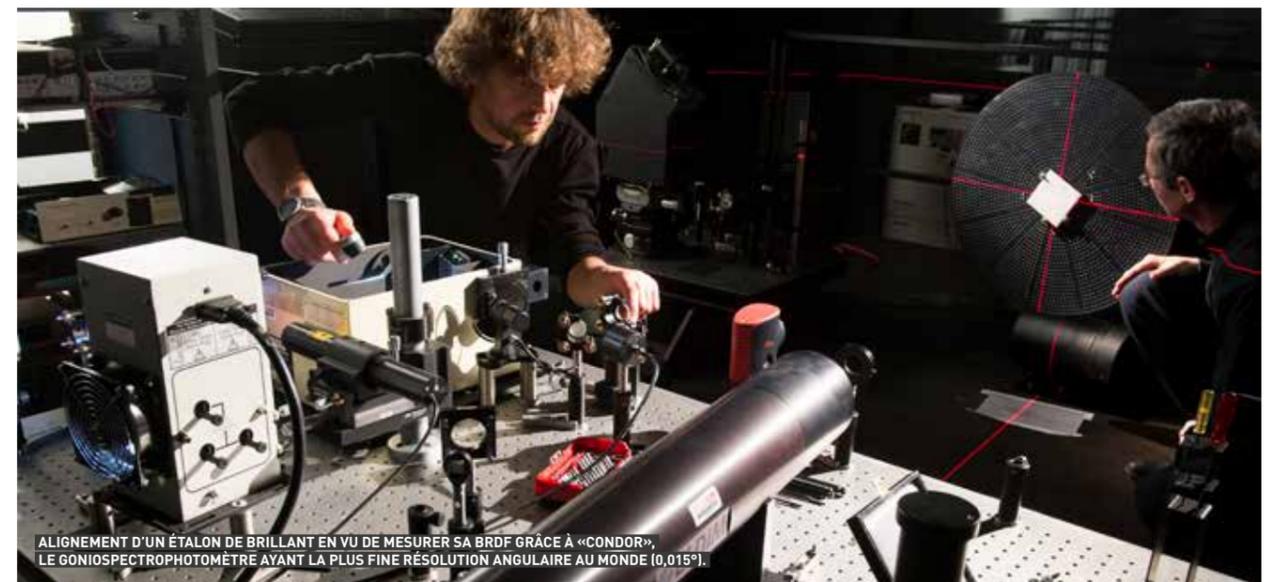
Le premier, est une collaboration entre huit laboratoires de métrologie, deux laboratoires universitaires et un industriel. Il vise à clarifier la manière dont doivent être réalisées les mesures à partir desquelles on extrait les caractéristiques visuelles de surfaces à effets particuliers. Plus précisément, la grandeur radiométrique qui permet de caractériser l'apparence d'une surface est la «fonction de répartition bidirectionnelle du facteur de réflexion», ou BRDF. D'un mot, elle indique dans quelle direction et avec quelle intensité une surface réfléchit un rayon de lumière incident. Or d'un côté, cette grandeur est intrinsèquement très complexe à mesurer. De l'autre, il n'existe pas encore de protocole standardisé permettant en pratique de l'adresser. Au LNE-LCM, les spécialistes se sont concentrés sur la mesure de la brillance d'un objet. En principe, celle-ci dépend la lumière réfléchi par l'objet dans la direction spéculaire. Cependant, en pratique, un détecteur offre toujours une ouverture de taille finie. Ainsi, les métrologues ont réalisé des mesures sur une série d'échantillons dans des conditions expérimentales de qualité métrologique, puis en les dégradant. A la clé en 2019 :

« Il s'agit d'une part de se mettre d'accord au niveau de la Commission internationale de l'éclairage sur la définition de ces grandeurs. »  
Gaël Obein, chercheur au LNE-LCM.

une quantification des erreurs de mesure en fonction de l'angle solide de collecte du signal. «C'est une première approche à partir de laquelle nous pourrions à terme établir des préconisations à destination des fabricants et utilisateurs d'appareils de mesure», ajoute Gaël Obein, du LNE-LCM.

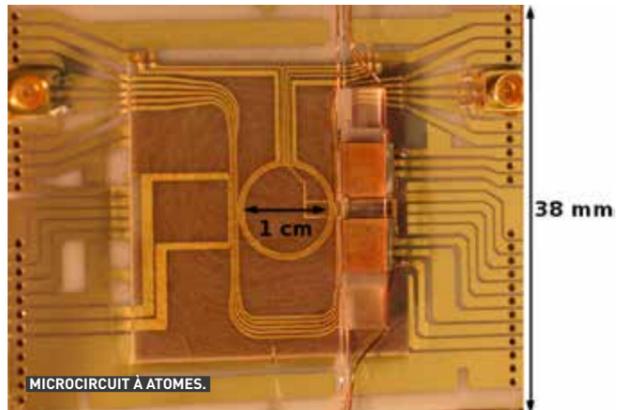
En parallèle, le second projet conduit par le physicien se donne pour objectif de définir de nouvelles grandeurs en relation avec l'apparence d'un objet. «Il s'agit d'une part de se mettre d'accord au niveau de la Commission internationale de l'éclairage sur la définition de ces grandeurs, d'autre part de développer les instruments de référence permettant de les mesurer», explique-t-il.

Au sein de la collaboration, certains partenaires se focalisent sur la translucidité d'une surface, liée à la «fonction de répartition bidirectionnelle du facteur de transmission» ou BTDF. Au LNE-LCM, les chercheurs travaillent de leur côté à définir une référence primaire pour la caractérisation de l'aspect visuel d'objets semi-transparents tels la peau ou le marbre. Leur texture particulière résulte pour partie d'une réflexion de la lumière dans de multiples directions après une diffusion en volume. Pour l'appréhender, il s'agit donc de pouvoir éclairer un objet en un point et détecter la lumière réfléchi en des points distants. «Pour ce faire nous nous appuyons sur notre goniospectrophotomètre qui constitue la référence pour la mesure de la BRDF, mais dont nous sommes en train de redessiner la partie détection», indique le chercheur. Objectif à terme : que la métrologie de l'apparence devienne aussi robuste que celle des masses ou du temps ! ■



ALIGNEMENT D'UN ÉTALON DE BRILLANT EN VU DE MESURER SA BRDF GRÂCE À «CONDOR», LE GONIOSPECTROPHOTOMÈTRE AYANT LA PLUS FINE RÉOLUTION ANGULAIRE AU MONDE (0,015°).

## TRANSPORTABLES, DES HORLOGES ATOMIQUES BIENTÔT ACCESSIBLES À «TOUS»



Guidage et navigation à longue portée, datation synchronisée de données d'un réseau de télescopes, certaines applications nécessiteraient de recourir à la précision du temps atomique sans avoir à se connecter à une horloge distante.

Dans ce but, les physiciens du LNE-SYRTE et du LKB (Laboratoire Kastler-Brossel) développent actuellement des horloges atomiques sur puces à atomes transportables.

Et ils ont montré l'année dernière qu'elles ont le potentiel pour être quasiment aussi précises que leurs alter ego de laboratoire.

Aujourd'hui, les horloges atomiques micro-ondes les plus performantes battent la seconde avec une incertitude relative de  $10^{-16}$  ou quelques  $10^{-17}$  en routine. Mais nécessitant une instrumentation volumineuse, elles restent attachées à un laboratoire.

Cependant, grâce aux puces à atomes, sur lesquelles on peut confiner un nuage d'atomes froids sur une surface de quelques centimètres carrés, il serait possible de réaliser des horloges atomiques tenant dans une valisette. Avec un tel dispositif, les chercheurs du LNE-SYRTE et du LKB ont obtenu en 2019 une incertitude relative inférieure à  $10^{-12}$  après un seconde de mesure.

Mais ils savent comment faire mieux. Précisément, en tirant parti d'un protocole de préparation quantique appelé «compression du bruit de spin». «Il s'agit de réaliser la mesure d'horloge sur un groupe d'atomes placés dans un état quantique tel que toute l'incertitude relative à la variable à mesurer aura été rejetée sur sa variable dite conjuguée», explique Carlos Garrido Alzar, du LNE-SYRTE. En principe, il serait alors possible d'afficher une incertitude autour de  $10^{-15}$ , en utilisant l'horloge sur puce actuelle.

Ainsi, l'année dernière, les scientifiques du LNE-SYRTE et du LKB ont démontré qu'ils étaient effectivement capables de préparer leurs atomes dans un état initial résultant du fameux protocole. Il leur reste désormais à démontrer qu'il permet bien d'atteindre la précision visée. ■

## L'UMT ACTIA SAFEMAT DÉSORMAIS INCONTURNABLE SUR LA SÉCURITÉ DES MATÉRIAUX AU CONTACT

En 2017, le LNE et l'UMR GENIAL créaient l'Unité mixte technologique (UMT) Actia SafeMat dédiée à la sécurité des matériaux et emballages dits au contact. Objectif : fédérer les compétences des deux entités sur le calcul et l'étude expérimentale pour appuyer les concepts d'ingénierie sûre des matériaux au contact des aliments. Deux ans plus tard, la vingtaine de projets menés, ou en cours sous l'égide de SafeMat, ont démontré tout l'intérêt de cette mise en commun qui permet le développement d'outils fondamentaux et de répondre aux besoins concrets des industriels.

C'est par exemple le cas avec le projet FMECA de développement d'un puissant outil de calcul des risques de contamination, avec en ligne de mire la prévention de crises sanitaires potentielles. Ainsi, sur le versant fondamental, les spécialistes ont travaillé à la consolidation et au développement de

leurs modèles de prédiction de la migration de substances des matériaux d'emballage vers les aliments. Comme le détaille Phuong Mai Nguyen, du LNE, «d'une part, en partant de modèles unidimensionnels simplifiés, nous en avons proposé une version 3D beaucoup plus réaliste ; d'autre part, nous avons étendu les modèles pour prendre en compte la possibilité d'un transfert en présence d'écoulement d'un fluide.» De plus, l'ensemble a été incorporé dans une interface conviviale pour l'utilisateur.

À la clé, des projets en collaboration avec différents industriels pour calculer la fraction recyclée à inclure dans un matériau pour une utilisation sûre, estimer la durée de vie de la tuyauterie d'un distributeur de boissons ou encore définir des seuils acceptables en cosmétologie. De quoi faire de SafeMat un interlocuteur désormais incontournable en son domaine. ■

## UNE MÉTROLOGIE POUR LES SURFACES OPTIQUES COMPLEXES EXACTES À MIEUX QUE 30 NANOMÈTRES

Pour des applications militaires, spatiales ou scientifiques de pointe, l'industrie optique repousse sans cesse les limites de la fabrication et la mesure de ses composants. Pour adapter la métrologie à ses besoins, le projet européen FreeFORM-15SIB01, piloté par le LNE et achevé au printemps dernier, a permis des développements instrumentaux et algorithmiques, de même que la réalisation d'étalons de transfert permettant de diagnostiquer des défauts de forme jusqu'à 30 nanomètres d'incertitude contre environ une centaine aujourd'hui.

Pour sa part, le LNE a proposé de nouveaux algorithmes permettant de traiter les données expérimentales. Concrètement, la mesure d'une forme complexe se traduit par un nuage de plusieurs centaines de milliers de points qu'il faut ensuite inter-

poler mathématiquement par une surface que l'on compare in fine à la forme théorique de l'objet à évaluer. Or les algorithmes usuels, fondés sur la méthode dite de moindres carrés, ne permettent pas d'atteindre l'objectif en termes d'incertitude. Pour ce faire, les scientifiques français ont étudié et implémenté des méthodes de type min-max pour améliorer les résultats de calcul du défaut de forme. Ils ont également généré plusieurs ensembles de points de référence à partir desquels ils ont pu démontrer le succès de leur nouvelle méthode.

En parallèle, des étalons de transfert en Zerodur ont été développés et caractérisés. Ils ont été utilisés pour des comparaisons inter-laboratoires entre les participants du projet. L'ensemble de ces résultats est désormais prêt à l'emploi. ■

## TOMOGRAPHIE X : UN NOUVEL ÉTALON MULTIFONCTION

La tomographie X est aujourd'hui la seule technique d'imagerie 3D non destructive qui permette l'analyse de pièces présentant des défauts internes, ainsi que de certaines propriétés de surface telle la rugosité. Cela rend cette méthode particulièrement adaptée à la fabrication additive (FA). Sa qualité métrologique (facteur d'échelle, profondeur de pénétration, erreur sur les mesures de longueur...) doit néanmoins encore être considérablement améliorée, ce qui est l'objet du programme européen AdvanCT, actuellement en cours, auquel participe le LNE. Dans ce cadre, les métrologues français, en collaboration avec leurs homologues danois, ont développé une nouvelle référence prenant la forme d'un étalon matériel représentatif des pièces réalisées en FA pour l'étalonnage des tomographes X.

Plusieurs équipes de par le monde ont déjà proposé de tel artefacts. Mais de forme relativement simple, chacun d'eux

ne permet d'adresser qu'un nombre très limité au regard de la dizaine de paramètres à prendre en compte pour assurer la qualité métrologique d'une tomographie X. Résultat : une opération d'étalonnage nécessite de nombreuses manipulations pendant plusieurs heures. Par ailleurs, ces étalons ne tiennent pas compte des spécificités de la FA.

Ainsi, «nous avons conçu un étalon complexe prenant la forme d'une pyramide de cinq cylindres, percée d'un trou central et présentant sur ses marches différentes calottes creuses avec en son sein des structures internes», détaille Anne-Françoise Obaton, du LNE. Qualifié métrologiquement à l'aide d'une machine à mesurer 3D de référence, ce nouvel étalon permet d'étalonner un tomographe X en une seule opération de mesure pour des applications en FA pour l'aéronautique, le spatial ou encore la médecine. ■



## NANOPARTICULES : VERS DES MESURES DE TAILLE EN MILIEU COMPLEXE

Alimentation, cosmétique, santé... les nanoparticules s'invitent dans notre quotidien. Et les produits qui en contiennent sont soumis à présent à des exigences réglementaires en matière d'étiquetage. Mais comment savoir si un produit contient des nanoparticules ? Pour répondre, les métrologues ont recours à la microscopie à force atomique ou bien la microscopie électronique à balayage. Néanmoins, ces techniques nécessitent une préparation complexe des échantillons à analyser pouvant altérer le comportement des nanoparticules (phénomène d'agglomération). Ainsi, les chercheurs du LNE ont démarré l'année passée un projet qui vise à déterminer s'il est possible d'utiliser des techniques, dites indirectes, pour remonter à la taille de nanoparticules directement dans le milieu complexe où elles se trouvent. Trois techniques ont été sélectionnées : la diffusion dynamique de la lumière, la diffractométrie de

rayons X et la diffusion des rayons X aux petits angles. Au terme de leur première année d'investigation, les spécialistes soulignent la grande complexité de la tâche. Comme l'explique Carine Chivas-Joly, du LNE, «La qualité de la mesure dépend énormément de la nature du produit étudié ainsi que de la technique utilisée qui se prête plus ou moins bien à des échantillons poly-disperses. Les cas de populations où les interactions entre les nanoparticules et/ou leur environnement peuvent notamment conduire à la formation d'agglomérats difficiles à analyser.» Dans le cadre de cette étude préliminaire, l'objectif des chercheurs est désormais de définir dans quel cadre et sur quel type de produits il est possible d'utiliser tel ou tel jeu de techniques expérimentales pour répondre à une question à fort impact sociétal. ■

## NANOPARTICULES : NAISSANCE D'UNE MÉTROLOGIE DÉDIÉE

Les nanoparticules sont partout. Pour autant, d'importantes difficultés subsistent pour les caractériser d'un point de vue métrologique. En particulier, la question de savoir comment les mesurer demeure essentiellement ouverte. Pour avancer, le projet européen nPSize, auquel participe le LNE, vise à proposer un ensemble de solutions en vue d'une normalisation des protocoles et procédures utilisés dans les différents laboratoires de métrologie. Concrètement, la question est de savoir ce que signifie mesurer les dimensions caractéristiques d'une population de nanoparticules, sachant qu'elles se présentent sous différentes tailles, formes, compositions chimiques ou polydispersités. Par ailleurs, elle se pose différemment selon la technique utilisée pour les mesurer. Enfin, pour chaque technique, il s'agit d'évaluer les incertitudes et d'assurer la traçabilité des mesures. De leur côté, les métrologues du LNE ont porté leurs efforts sur l'utilisation de la microscopie électronique à balayage qui permet d'obtenir des clichés à partir desquels on peut mesurer le diamètre latéral des nanoparticules. Pour fiabiliser leurs mesures, ils en ont notamment développé un modèle qui permet en particulier de définir précisément le bord d'une particule. Ils ont également défini le protocole assurant le raccordement de leur méthode au microscope à force atomique métrologique qui est l'instrument de référence national. Enfin, pour renforcer la comparabilité des mesures effectuées avec différentes techniques de microscopie, les spécialistes français ont proposé un protocole permettant aux différentes équipes de réaliser des mesures à partir du même jeu de nanoparticules, et non pas des particules différentes bien qu'issues du même lot. Ceci pour qu'enfin le nanomètre puisse prétendre à une exactitude au... nanomètre près ! ■



OBSERVATION DE NANOPARTICULES AU MEB.



UTILISATION D'ALGORITHME DE DEEP LEARNING POUR LA RECONSTRUCTION D'IMAGES DE NANO-PARTICULES.

## NANO-MÉTROLOGIE : LE RENFORT DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Un algorithme à base de réseaux de neurones et de techniques d'apprentissage profond permet d'optimiser la mesure de la taille de nanoparticules.

Pour déterminer la taille de nanoparticules, les métrologues se fondent sur des clichés obtenus par microscopie électronique à balayage. Précisément, à partir de plusieurs centaines de mesures, ils produisent une distribution statistique des diamètres d'une collection de nano-objets. Malheureusement, pour y parvenir, les méthodes classiques, essentiellement manuelles, ne fonctionnent que sur des particules dont la totalité du contour est visible à l'image. Or sur un cliché, la plupart se présentent sous la forme d'agrégats où elles sont partiellement masquées. Résultat : moins de 10 % de l'information disponible sur un cliché est concrètement mise à profit pour la mesure.

« Nous avons utilisé une méthode fondée sur la mise en compétition de réseaux de neurones. »

Loïc Coquelin, Ingénieur de recherche en mathématiques appliquées au LNE.

Pour tirer parti de l'information «manquante», les spécialistes du département Matériaux du LNE se sont tournés vers leurs collègues du département Science des données et incertitudes. Ces derniers ont répondu présents, proposant une solution à base de réseaux de neurones et d'apprentissage profond aujourd'hui opérationnelle. La problématique était en réalité double. D'une part identifier de façon automatique toutes les particules sur un cliché, qu'elles soient isolées ou agrégées ; d'autre part reconstruire le contour de chacune à partir d'une information tronquée. C'est à ce dernier défi, celui de la complétion des particules, que les spécialistes se sont d'abord attelés. Pour le relever, ils ont développé un algorithme capable de prédire le contour d'une particule partiellement masquée, après une phase d'apprentissage à partir d'une base de données dédiée. «Nous avons utilisé

une méthode fondée sur la mise en compétition de réseaux de neurones où, en parallèle, un réseau apprend à générer la partie manquante du contour d'une particule, tandis que l'autre s'entraîne à distinguer une image reconstruite d'une image réelle», précise Loïc Coquelin, du LNE. Résultat : pas plus de 5 % d'erreur sur un contour pour une obturation de 30 %. Initié en 2017, cette première partie a ensuite été optimisée en 2018.

Par la suite, les mathématiciens se sont attaqués à la tâche dite de segmentation consistant à identifier plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de particules sur un cliché. La difficulté : la base de données initiales, à fournir à un algorithme classique de reconnaissance d'image pour ce faire, est tout simplement hors de portée. Pour pallier cette difficulté, les scientifiques du LNE ont donc opté pour la méthode dite du transfert d'apprentissage. «Parmi les approches existantes, la plus utilisée consiste à nourrir les premières couches d'un réseau de neurones avec les poids d'un réseau pré-entraîné sur un problème différent, avant d'entraîner spécifiquement ses dernières couches pour la segmentation des nanoparticules», explique le chercheur. Ainsi, aujourd'hui, un démonstrateur implémentant la totalité de la chaîne d'analyse est prêt. Une thèse démarrée début 2020 a pour but de définir les éléments de méthodologie pour assortir les résultats de mesure d'une incertitude métrologique. A la clé : une méthode bientôt à disposition du département Matériau qui pourrait bien devenir à terme un standard de la nano-métrologie. ■

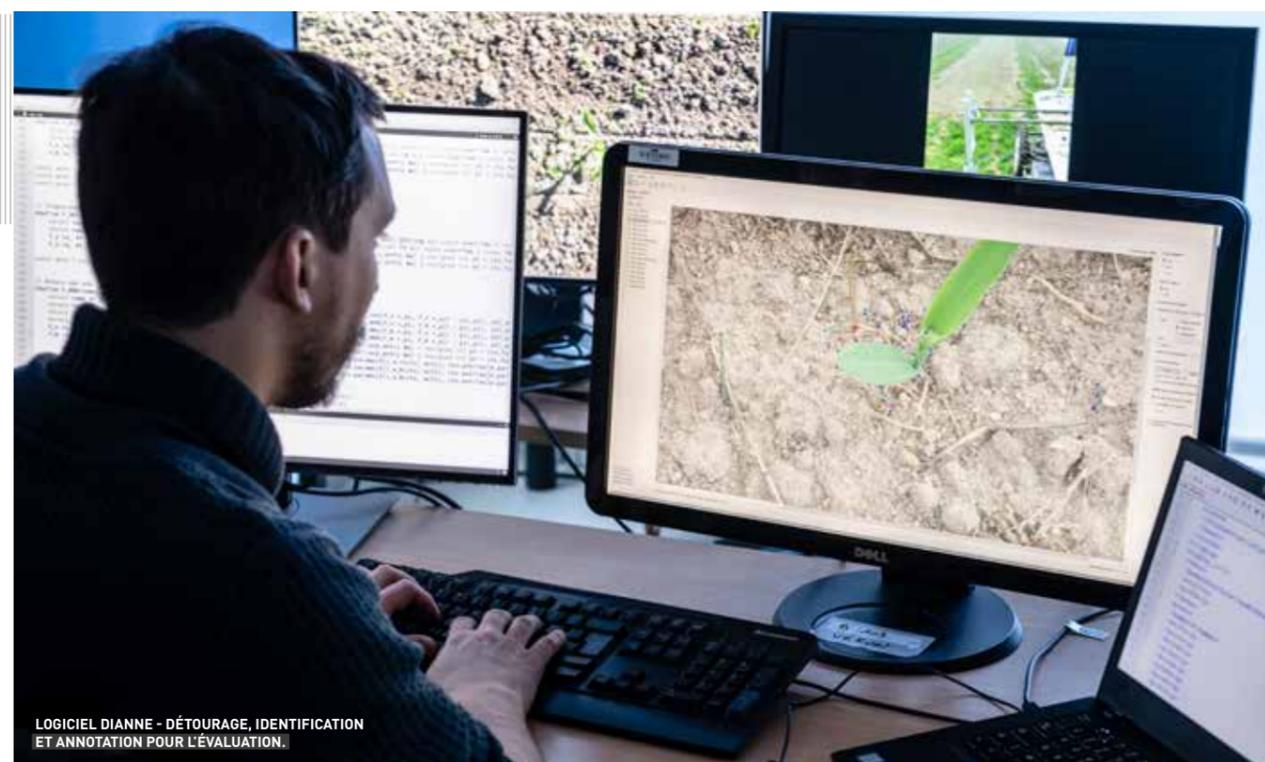
## LE LNE ACCOMPAGNE LE DÉPLOIEMENT DES ROBOTS À LA FERME

Robots autonomes pour la traite, le désherbage, le semis ou la manutention, la robotique et l'intelligence artificielle sont en passe de révolutionner les pratiques agricoles. Si ce n'est qu'en matière d'interaction Homme/machine à la ferme ou aux champs, tout est à construire. En particulier en ce qui concerne la définition des normes de sécurité et la mise en conformité des machines avec la réglementation, et ce dans un cadre juridique qui, a priori, n'a pas été pensé dans la perspective de voir les robots se mettre au vert.

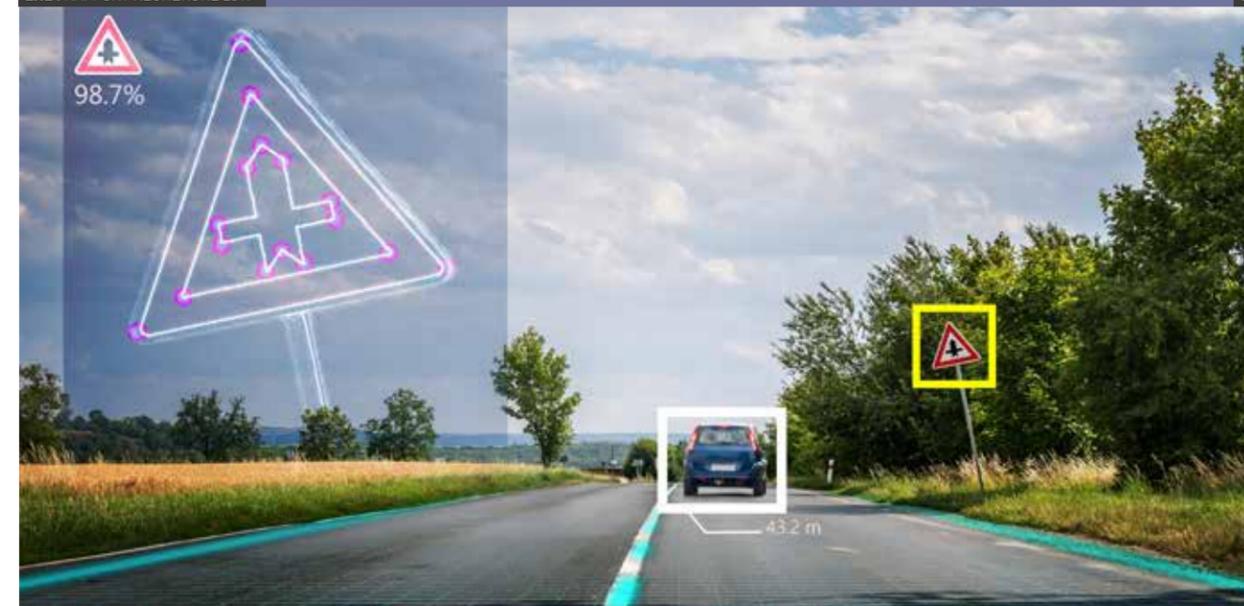
D'où le projet porté par l'association RobAgri et financé par France Agrimer, auquel participe le LNE, en collaboration avec des industriels et des acteurs du monde académique. Objectif pour le laboratoire : définir une méthodologie permettant aux professionnels du secteur, notamment les fabricants de robots, d'adresser concrètement l'ensemble de ces problématiques. Pour ce faire, les spécialistes du LNE ont conduit des observations in situ chez quatre fabricants de robots partenaires du projet, et étudié en détails les spécifications techniques de leurs machines autonomes. «*En croisant l'ensemble de ces informations, notre but est d'identifier les éventuels nouveaux risques d'accidents liés à l'autonomie des machines, et d'accompagner l'industrie de la robotique agricole dans la compréhension des exigences de la réglementation.*», précise Agnès Delaborde, du LNE. De quoi faire du laboratoire un partenaire incontournable de la robotisation des exploitations agricoles. ■

### METRICS, LE LNE ARBITRE DES ROBOTS

Dans le cadre du projet européen METRICS coordonné par le LNE, 17 partenaires de huit pays s'apprentent à organiser quatre compétitions de robots dans les domaines de la santé, de l'inspection et maintenance des infrastructures, de la production agile et de l'agro-alimentaire. Outre la coordination, le LNE est chargé de définir la méthodologie rigoureuse d'organisation de campagnes d'évaluation qui sera transverse aux quatre compétitions. Fidèle à sa mission et aux orientations qui lui ont été données par les autorités publiques, le LNE aura pour objectif de bâtir pour la première fois une structure pérenne rassemblant l'ensemble des compétences européennes pour apporter conjointement une solution satisfaisante à la question de l'évaluation des systèmes robotisés, condition impérative de leur acceptabilité. ■



LOGICIEL DIANNE - DÉTOURAGE, IDENTIFICATION ET ANNOTATION POUR L'ÉVALUATION.



## TEST DE SÉCURITÉ DES VÉHICULES AUTONOMES : LA SOLUTION VIRTUELLE

Comment s'assurer de la sécurité des véhicules autonomes (SVA) quand les spécialistes de l'intelligence artificielle estiment qu'il faudrait plusieurs milliards de kilomètres de tests de roulage pour y parvenir ? La réponse réside dans la simulation numérique, seule solution permettant d'explorer en un temps raisonnable une problématique à la complexité a priori sans limite. D'où le projet SVA, regroupant plusieurs laboratoires académiques et des industriels, auquel le LNE a participé, visant à développer des outils pour tester virtuellement l'ensemble des comportements d'un véhicule autonome. Dans ce cadre, les chercheurs du LNE ont eu pour tâche d'évaluer un logiciel dit de «*traffic jam chauffeur*», ou TJC, développé par PSA, capable d'assurer l'autonomie d'un véhicule au sein d'un bouchon. Pour ce faire, les scientifiques ont créé des

références sur lesquels les résultats du logiciel sont comparés et analysés, références construites à partir d'algorithmes d'optimisation sous contraintes, celles-ci traduisant un ensemble de règles de sécurité et de confort que le logiciel doit respecter. Résultat : «*nous apportons une preuve de concept accompagné d'un démonstrateur aux constructeurs, pour réussir à évaluer la prise de décision du véhicule autonome. Le but étant de garantir à terme un fonctionnement sûr du véhicule*», explique Rémi Régnier, du LNE.

Pour se rapprocher d'outils prêts à l'emploi, les chercheurs poursuivent leurs développements dans le cadre du projet 3SA qui a pris dans le courant de l'année passée le relais de SVA. De quoi envisager à terme des protocoles virtuels de certification pour la sécurité des véhicules autonomes. ■

## VOXCRIM : UNE MÉTROLOGIE POUR LA COMPARAISON D'ENREGISTREMENTS VOCAUX

Comment savoir si une personne enregistrée à son insu, dans le cadre d'écoutes téléphoniques, est bien celle présente en interrogatoire ? Pour ce faire, des experts procèdent à des comparaisons de voix. Mais comment garantir la fiabilité de ces comparaisons ? C'est l'enjeu du programme Voxcrim, actuellement en cours, auquel participe le LNE en collaboration avec les centres techniques et scientifiques de la police et de la gendarmerie, l'Université d'Avignon et le Laboratoire de Phonétique et de Phonologie et l'Université d'Aix-Marseille. Pour ce faire, Voxcrim se propose de définir les caractéristiques, qui font qu'une voix est reconnaissable et différenciable d'une autre, en analysant un corpus de plusieurs milliers d'échantillons par des méthodes d'intelligence artificielle.

A la suite, les chercheurs du LNE auront pour tâche de développer des algorithmes permettant d'affirmer si oui ou non ces caractéristiques se trouvent sur un échantillon particulier, sans quoi une méthode de comparaison, même robuste, n'aurait aucune chance d'aboutir à un résultat fiable.

Comme l'explique Olivier Galibert, du LNE, «*au terme du projet, il sera alors possible de tester toute méthode de comparaison d'enregistrements sur les données Voxcrim afin d'en garantir la fiabilité, et ce faisant de l'accréditer. Et par ailleurs d'indiquer que la probabilité d'une comparaison de deux enregistrements particuliers fournisse un résultat exploitable.*» De quoi estimer in fine si ce résultat peut être recevable par un tribunal. ■

# EURAMET, LE CHOIX GAGNANT DE LA MÉTROLOGIE EUROPÉENNE



Depuis 30 ans, EURAMET structure la métrologie européenne. Alors que prend fin le programme EMPIR de la Commission européenne et que déjà s'annonce son successeur, les outils se mettent en place pour une coordination pérenne des actions en métrologie sur le continent.



Rendue nécessaire par la mise en place d'un vaste marché international dans le courant du XIX<sup>e</sup> siècle, la métrologie moderne est fondée sur l'idéal d'universalité issu des Lumières. Autrement dit, dès l'origine, il apparaît qu'elle ne peut avoir de sens qu'en tant qu'activité commune.

Dans un monde qui n'a jamais été aussi scientifique et technique, faisant face à des enjeux économiques, sociétaux et environnementaux à l'échelle globale, les besoins en métrologie de pointe vont croissants. Ainsi, il est clair qu'au niveau européen, la mise en place de normes communes et utilisables par tous ne peut se faire qu'à l'échelle du continent.

En 1987, c'est le sens de la création de l'association EUROMET – qui deviendra par la suite EURAMET – qui se donne pour objectif de développer, entretenir et disséminer une infrastructure européenne intégrée sur la mesure. D'abord pensé pour favoriser les échanges entre experts, EURAMET est au fil du temps devenu la colonne vertébrale des projets en métrologie du continent.

Alors qu'arrive bientôt à son terme le programme EMPIR, dans le cadre du programme-cadre de la Commission européenne Horizon 2020 (H2020), les métrologues européens préparent déjà leur participation au futur programme Horizon Europe, qui prendra la suite d'H2020 à partir du 1er janvier 2021. Ce faisant, la métrologie européenne est en passe d'achever sa structuration à l'échelle européenne. L'occasion de revenir sur la formidable aventure collective que constitue EURAMET.

«A l'origine, l'idée était d'offrir une structure permettant

des échanges simples entre laboratoires nationaux sur des aspects recherche, ainsi que pour des intercomparisons, y compris avec des pays émergents», raconte Maguelonne Chambon, directrice de la recherche scientifique et technologique du LNE. Beat Jeckelmann, son alter ego au METAS, l'Institut fédéral suisse de métrologie complète : «Le constat était évident : nous avons les mêmes objectifs, d'où l'intérêt de pouvoir mettre en commun des compétences et des savoir-faire.»

Les débuts sont très informels, mais amorcent la mise en place d'une métrologie commune. Et conduisent en 1999 à la mise en place de l'Arrangement de reconnaissance mutuel du CIPM (CIPM MRA), soit la structure permettant aux laboratoires nationaux de métrologie de démontrer l'équivalence internationale de leurs étalons de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage qu'ils émettent.

En même temps, de plus en plus de pays rejoignent EURAMET qui compte aujourd'hui 38 membres. Le début des années 2000 voit la mise en place des premiers projets coopératifs. Et en 2007, l'association change de statut légal de façon à pouvoir inscrire de plein pied ses programmes de métrologie dans le cadre des projets de R&D de la Commission européenne. Ainsi, en 2008, le projet iMERA-Plus, doté d'un budget de 64 millions d'euros, constitue la phase préliminaire du premier programme européen de recherche en métrologie (EMRP). «C'était un petit programme, une sorte de démonstrateur permettant de convaincre la Commission que la communauté métrologique était capable de monter des projets de recherche et développement», se souvient le métrologue suisse.

Fort de ce premier succès, l'EMRP, doté d'un budget de 400 millions d'euros et impliquant 23 pays, voit ensuite la réalisation de 119 projets entre 2009 et 2013. A sa suite, le programme EMPIR, qui se terminera cette année, fait émerger lui aussi une centaine de projets pour un budget total de 600 millions d'euros. Par rapport aux débuts d'EURAMET, l'ambition a du reste évoluée. Il ne s'agit plus de répondre aux besoins de tel ou tel laboratoire national de métrologie, mais d'adresser de manière concertée les grands enjeux économiques, industriels, environnementaux et sociétaux du temps. Et ce en collaboration étroite avec les acteurs concernés, de même qu'avec les mondes universitaire et académique.

Maguelonne Chambon résume : «EURAMET est devenu le point d'entrée incontournable de la communauté métrologique vers les grands programmes européens.»

Ainsi, les métrologues européens se sont impliqués dans des projets allant de l'industrie à la santé en passant par l'énergie, l'environnement, les nouvelles technologies et bien entendu le Système International d'unité. Comme l'analyse Maguelonne Chambon, «nous avons notamment observé la montée en puissance de besoins métrologiques forts dans les domaines de l'environnement et de la santé, nécessitant des réponses concertées à l'échelle du continent et l'implication conjointe de tous les acteurs concernés. De même dans les domaines du GNSS, des nanotechnologies ou de l'information quantique, il aurait été impensable qu'un pays puisse travailler seul.»

Parmi tant d'autres, la scientifique cite par exemple un projet sur les mesures d'humidité et de température dans des conditions transitoires, en lien avec les sciences du climat. Ou bien un autre sur la mise en place de protocoles de mesure pour le diagnostic des maladies neuro-dégénératives. «Je pense également à la métrologie pour la fabrication additive pour la réalisation d'implants. Il est clair que sans les programmes européens, nous n'aurions pu avancer sur cette thématique», ajoute Maguelonne Chambon. De son côté, Beat Jeckelmann met en avant les programmes visant à développer des références pour mesurer et assurer la stabilité des réseaux électriques ou évaluer la qualité du gaz injecté dans le réseau de distribution.

Par ailleurs, le programme EMPIR a eu un impact très fort sur les aspects de normalisation qui sont en particuliers essentiels pour les industriels. En témoigne par exemple les projets sur la qualité de l'hydrogène, la mesure de l'apparence, notamment félicité par la Commission internationale de l'éclairage, ou encore les propriétés thermo-physiques des matériaux.

A l'évidence, à la suite des programmes EMRP et EMPIR, la métrologie européenne, sous l'égide d'EURAMET, est parvenue à un haut niveau de maturité. «Nous avons beaucoup coopéré et appris à travailler ensemble, commente Beat Jeckelmann, avant d'ajouter : Désormais, nous devons progresser sur la coordination.» De fait, début 2021, la Commission européenne lancera Horizon Europe, son neuvième programme-cadre pour la recherche et l'innovation, dont le volet métrologie sera doté d'un budget de 700 millions d'euros. Or, signe particulier, celui-ci sera aussi le dernier du genre, obligeant à son terme, en 2027, les entités qui l'animent et en bénéficient à imaginer dès maintenant un au-delà aux programmes-cadres de la Commission pour pérenniser les synergies qu'ils ont fait émerger.

Concernant la métrologie, EURAMET a ainsi lancé l'année dernière une série de six réseaux européens de métrologie ou EMN (European metrology networks).



«EURAMET est devenu le point d'entrée incontournable de la communauté métrologique vers les grands programmes européens.»

Maguelonne Chambon, directrice de la recherche scientifique et technique du LNE.



«Nous avons beaucoup coopéré et appris à travailler ensemble. Désormais, nous devons progresser sur la coordination.»

Beat Jeckelmann, directeur scientifique du METAS et ancien président d'EURAMET.

Leur rôle : analyser les besoins et mettre en place des stratégies coordonnées entre les différents acteurs et utilisateurs de la métrologie sur les aspects de recherche, d'infrastructure, de transfert de connaissance et de services. «A terme, l'idée est de mettre en place de véritables laboratoires virtuels pérennes à l'échelle européenne pour répondre à l'ensemble des besoins métrologiques du continent», explique Beat Jeckelmann.

Précisément les EMN couvriront les domaines suivants : Mathématiques et statistiques, Médecine, Technologies quantiques, Réseaux électriques intelligents, et Climat et observation de l'océan. Un autre est en cours de création sur la radiothérapie pour le diagnostic du cancer. «L'ensemble des EMN couvrent l'ensemble des grands défis définis par la Commission européenne pour Horizon Europe», précise le métrologue. Maguelonne Chambon complète : «Ces réseaux ont commencé à travailler l'année passée afin de faire remonter l'ensemble des besoins des laboratoires, des centres techniques et des industriels en matière de métrologie pour la prochaine décennie.» Ainsi, les métrologues européens seront prêts pour répondre aux appels à projet de la Commission à partir de 2021. Puis, au-delà de la décennie qui s'ouvre, pour faire vivre l'idéal d'universalité et de pérennité de leur discipline sur le vieux continent. ■

## LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE INCONTOURNABLE EN EUROPE

iMERA-Plus, EMRP, EMPIR, la France se place en troisième position derrière l'Allemagne et la Grande-Bretagne en terme d'investissement dans les différents projets en métrologie de la Commission européenne. Ainsi, les métrologues français étaient présents dans 84 des 119 projets du programme EMRP et dans 97 projets sur 206 du programme EMPIR. Selon Maguelonne Chambon, «un des points forts de la France est la très forte mobilisation de la communauté académique (CNRS, CEA, universités et CHU) dans les projets en métrologie, et ce sur tout le territoire national.» Ces alliages vertueux ont notamment permis à la communauté métrologique de produire des résultats de premier plan dans le cadre de la réforme du Système International d'unité, entrée en vigueur fin 2018.

A cet égard, la scientifique cite par exemple les travaux réalisés par le LNE sur la balance de Kibble pour la réforme du kilogramme qui ont conduit les métrologues à collaborer avec leur collègue physiciens de Supélec pour la modélisation de circuits magnétiques. ■

# LE PRIX LNE DE LA RECHERCHE

Créé en 2009, le Prix LNE de la Recherche, vise à récompenser les chercheurs contribuant à la réussite et à la réputation scientifique du Réseau National de la Métrologie Française qu'il pilote et de sa propre activité de recherche. La onzième édition a mis à l'honneur, Gaël Obein du LNE-Cnam, et Marie-Christine Lépy du LNE-LNHB, pour leurs travaux respectifs sur les rayonnements optiques et sur les rayonnements ionisants.

## MARIE-CHRISTINE LÉPY : LES RAYONS X AU SERVICE DE LA MÉTROLOGIE



«Je ne vois pas ce que j'ai apporté de particulier», s'interroge sans fausse modestie Marie-Christine Lépy. Tout juste lauréate du Prix LNE de la recherche 2019, elle précise : «Ce dont on va parler est le fruit d'un travail d'équipe et je tiens avant tout à remercier mes proches collègues qui ont largement contribué à ces succès.»

Directrice de recherche au LNE-LNHB/CEA, cette

physicienne nucléaire est une spécialiste des spectrométries gamma et X, techniques qu'elle a largement contribué à développer et grâce auxquelles elle a obtenu d'importants résultats aussi bien en physique fondamentale qu'en science des matériaux ou en développement instrumental.

Après une thèse en physique nucléaire soutenue en 1982, cette Expert Senior au CEA entre deux ans plus tard au LNE-LNHB. Sa spécialité d'alors : les rayons gamma, ces photons ultra énergétiques émis par les noyaux atomiques lors de leur désintégration. Très vite, la physicienne qui deviendra par la suite responsable de la spectrométrie gamma et X au LNE-LNHB étend ses compétences aux rayons X émis par les atomes lors du réarrangement de leur cortège électronique.

Le lien entre les deux ? Les photons X et gamma constituent une véritable carte d'identité des éléments qui les émettent. Et réciproquement, ils sont une formidable sonde permettant d'explorer l'intimité de la matière. C'est particulièrement vrai des rayons X émis par une source synchrotron, c'est-à-dire par des électrons mis en rotation dans l'anneau de stockage d'un accélérateur de particules. «Contrairement aux X émis par des radionucléides, le rayonnement synchrotron offre un faisceau mono-énergétique et ajustable en énergie», explique la physicienne qui, au début des années 2000, lors d'une visite des installations du Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique (LURE), à Orsay, entrevoit immédia-

tement tout le potentiel du rayonnement synchrotron pour la métrologie.

D'où son engagement sans faille pour que le synchrotron de troisième génération du LURE, SOLEIL, inauguré en 2006, dispose d'une ligne dédiée à la métrologie. «L'investissement du LNE à la ligne dénommée «Métrologie», est l'une de mes plus grandes satisfactions, confie celle qui participe au comité consultatif de la conférence européenne sur la spectrométrie X. Et d'ajouter : ça l'est d'autant plus que la métrologie n'est pas toujours très bien considérée, ou du moins bien comprise.» En cause, un domaine où les découvertes sensationnelles sont rares, mais où tout est affaire d'effets subtiles, peu spectaculaires, mais néanmoins essentiels. Les travaux de Marie-Christine Lépy, pour mettre à jour les valeurs tabulées des paramètres relatifs à l'interaction du rayonnement X avec la matière (coefficient d'atténuation, coefficient de Coster-Kronig, rendements de fluorescence), en sont un parfait exemple. «Des données existaient sous forme de valeurs calculées ou ajustées empiriquement, mais elles n'étaient pas toujours en accord les unes avec les autres», explique la scientifique. D'où son initiative, il y a une dizaine d'années, d'y mettre bon ordre au sein d'un petit groupe de spécialistes européens. Ces dernières années, Marie-Christine Lépy s'est également intéressée aux matériaux en couches minces pour les cellules



MARIE-CHRISTINE LÉPY

THOMAS GRENON

GAËL OBEIN

photovoltaïques ou les mémoires rapides. L'enjeu : documenter précisément la structure de l'interface entre deux couches successives dont dépendent de manière cruciale les propriétés de ces matériaux. Le lien avec l'autre projet ? «Chez moi, une étude en entraîne une autre, il n'y a pas de plan», répond la coordinatrice du Groupe de travail sur la spectrométrie gamma à l'International Committee for Radionuclide Metrology (ICRM). Pas de plan, mais néanmoins un fil conducteur : «J'aime entrer dans le détail des choses», poursuit Marie-Christine Lépy. Ses

travaux pour la caractérisation métrologique de détecteurs pour la physique des rayons X et gamma en sont l'illustration. «Un métrologue est quelqu'un qui ne croit pas à ce qu'on lui dit, qui ne peut pas s'empêcher de tout remesurer dans le but d'améliorer les incertitudes», commente la chercheuse qui se dit par ailleurs portée par l'envie de découvrir de nouvelles choses. Et dont on ne peut plus douter des raisons qui lui valent aujourd'hui d'être récompensée. ■

## GAËL OBEIN : LA SENSATION AU TRÉBUCHET DE LA MÉTROLOGIE



De quelle couleur voit-on un objet, le trouvons-nous brillant, trop brillant ? Pour une part, ces questions appartiennent à l'univers des sensations, autrement dit de la subjectivité. Dans cet univers, un métrologue, par définition tenu à un devoir d'objectivité et de précision, a-t-il sa place ? A l'évidence, la réponse est oui, ce dont témoigne le cas de Gaël Obein, responsable amont du département photonique du

Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam. Les travaux de cet opticien spécialiste du brillant visent en effet à faire de nos sensations visuelles des grandeurs mesurables à l'instar d'une masse ou d'une longueur. Travaux pour lesquels il a reçu le Prix LNE de la recherche 2019.

L'hypothèse de départ n'a pourtant rien d'une évidence. Comme l'explique en effet le physicien, «on est ici au carrefour de quatre

disciplines que sont l'optique physique, la perception, avec sa dimension psychologique, et entre les deux la physiologie de l'œil et le traitement neuronal de l'information visuelle.» Ce qui fait tout l'intérêt de la chose. «Par rapport à une caméra CCD, la rétine est un capteur catastrophique. Pourtant, le traitement cortical de l'information recueillie par la rétine offre in fine une image à la qualité inégalée, poursuit le spécialiste. En tant que métrologue, on ne peut être que fasciné, avec cette idée qu'une compréhension fine de ces mécanismes offrirait la possibilité de mesurer des images bien au-delà de ce que l'on sait faire aujourd'hui.»

Voilà pour l'horizon. Mais concrètement, comment mettre en place une métrologie de la perception visuelle ? Il semble que Gaël Obein était désigné pour cette tâche. Titulaire d'un diplôme d'IUT de mesures physiques, il s'oriente ensuite vers l'optique et effectue son doctorat sous la direction de Françoise Viénot, psycho-physicienne au Muséum national d'histoire naturelle, sur le thème «Caractérisation optique et visuelle du brillant». S'en suit un post-doc au NIST avant une entrée au Cnam en 2006. Les pièces du puzzle sont alors en place.

Concrètement, la première question que se pose le jeune

chercheur est de savoir s'il est simplement possible de relier une sensation à une grandeur physique. Pour y répondre, il réalise des expériences psycho-visuelles qui démontrent que la sensation de brillance d'un objet est indépendante de l'éclairage sous lequel on l'observe. Il y donc là quelque chose qui résiste à la subjectivité, autrement dit que l'on doit pouvoir appréhender avec un instrument de mesure physique.

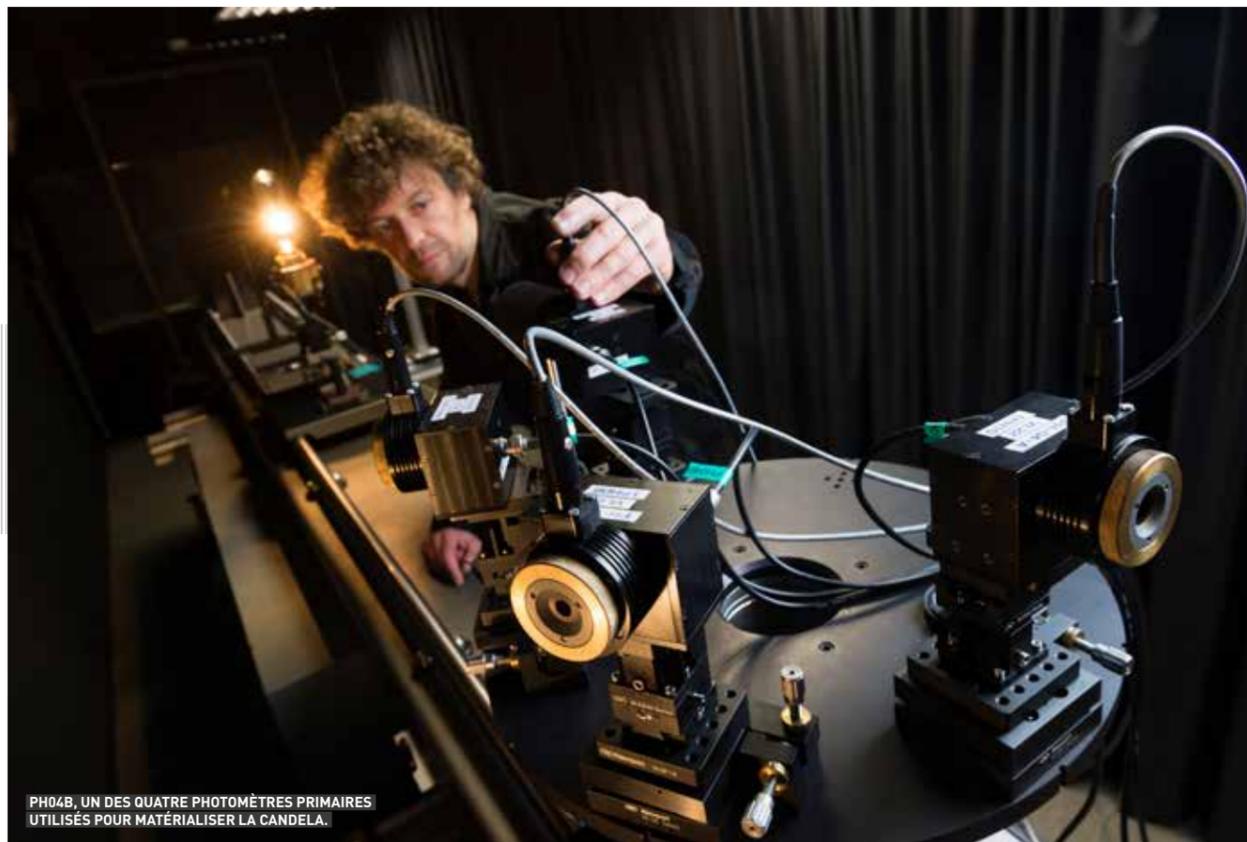
En l'occurrence, la grandeur physique permettant d'accéder à la brillance est ce que les opticiens appellent la BRDF, ou «fonction de répartition bidirectionnelle du facteur de réflexion», qui encode la façon dont une surface réfléchit une lumière incidente. Ainsi, au sein du LNE-Cnam, Gaël Obein a développé l'instrument de référence pour la mesure de cette grandeur radiométrique, un goniospectrophotomètre.

Concernant une problématique jeune et complexe, beaucoup reste à faire : définition des mesurandes, adoption des définitions par les instances métrologiques mondiales, conception instrumentales, mise en place des bonnes pratiques métrologiques à destination de l'industrie... Et Gaël Obein est sur tous les fronts, comme l'illustrent ses responsabilités dans différents projets à l'échelle européenne (projets xDReflect, BiRD et BxDiff).

Le scientifique le confie, «ce qui m'anime, c'est de pouvoir réaliser des mesures que personne n'a jamais effectuées avant, et de pousser leur exactitude au plus haut niveau possible.» Il ajoute : «A terme, brillance, scintillement, translucidité... j'aimerais aller vers la possibilité d'unifier l'ensemble des mesures qui concourent à décrire l'apparence d'un objet qui pour un observateur humain s'appréhende comme un tout.»

S'agissant d'un domaine où la subjectivité n'est jamais très loin, ne s'agit-il pas là d'un rêve un peu «fou» de métrologue, comme si nos impressions ou sensations pouvaient toutes entières se plier à la rationalité de la mesure ?

Celui qui préside le CIE-France, comité miroir national de la Commission internationale de l'éclairage, depuis 2017 précise : «il est bien évident que l'on ne peut pas tout mesurer, et assurément pas ce qui relève de l'intime. En ce sens, on ne mesure pas une sensation comme une longueur. Pour autant, à travers la notion d'individu moyen et en corrélant la perception à des grandeurs physiques objectives, il est remarquable de pouvoir s'approcher d'une forme d'exactitude en la matière.» Une forme de justesse entre sensation et métrologie à laquelle Gaël Obein aspire et qu'il contribue à faire émerger. ■



PH04B, UN DES QUATRE PHOTOMÈTRES PRIMAIRES UTILISÉS POUR MATÉRIALISER LA CANDELA.

## «LE SI ET LA MÉTROLOGIE EN FRANCE», UN OUVRAGE SUR LES UNITÉS DE MESURE

La révision du système international d'unités (SI) a été entérinée lors de la 26ème Conférence générale des poids et mesures de 2018, pour une mise en application préconisée au 20 mai 2019. Le LNE a choisi de célébrer cet événement par plusieurs manifestations et la parution d'un ouvrage sur l'implication du Réseau National de Métrologie Française (RNMF) dans la réalisation de ces nouvelles définitions. «Le SI et la métrologie en France - Des unités de mesure aux références» a été dévoilé lors du congrès international de métrologie en septembre 2019. Destiné aux utilisateurs d'appareils de mesure, scientifiques, ingénieurs, enseignants ou étudiants, l'ouvrage explique les principes de la métrologie. Prenant en compte les toutes dernières évolutions du système d'unités SI, il expose en détail

le large panel de références métrologiques développées et conservées par les instituts nationaux de métrologie, dont le RNMF est le représentant français.

Ces références nationales sont essentielles pour garantir la validité de la multitude des mesures qui assurent le fonctionnement de notre société et de nos industries.

Les auteurs, membres de la direction de la recherche scientifique et technologique, ont pris le parti de revenir sur de multiples principes scientifiques qui permettent de construire notre référentiel en France. On y trouve donc, entre autres, l'utilisation de l'interférométrie en métrologie, le rôle du spectre de la vision humaine, des applications de la physique quantique ou encore des notions de physique atomique. ■



## FÊTE DE LA SCIENCE AU LNE : LES MESURES EN SCIENCE

De la mesure de nanoparticules à la mesure de température en passant par la mesure des performances d'une intelligence artificielle, à l'occasion de la Fête de la science, le LNE a invité le grand public à découvrir toute l'étendue du monde de la mesure pendant une journée exclusive ponctuée d'ateliers, d'expériences et de visites de laboratoires. 350 visiteurs se sont succédés tout au long de la journée pour découvrir les quatre grandes thématiques mises à l'honneur : «Environnement et santé», «IA et science des données», «Mesure au quotidien» et «Système international d'unités».

En Ile de France, la mesure a été cœur l'édition 2019 de la Fête de la science puisque la région a défini comme thème régional «Les mesures en science», et a nommé Valérie Morazzani, chef du Département Programmation recherche et développement du LNE, ambassadrice régionale. Elle a eu pour rôle de valoriser les actions menées au sein de la région ainsi que l'implication de l'ensemble des acteurs - scientifiques, enseignants, médiateurs - au niveau régional.

Cette thématique de la mesure en science est au cœur de toutes les activités du LNE qu'il s'agisse des essais, de la certification, de la recherche et bien sûr de la métrologie et des étalonnages. C'est donc tout naturellement que le LNE a participé à cette édition et en ouvrant les portes de ses laboratoires pour faire découvrir au grand public les enjeux de la mesure. ■



## HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

### LNE-SYRTE

Rémi Geiger, le 28 juin 2019

«Interférométrie atomique : de la physique fondamentale aux applications»

## THÈSES SOUTENUES

### LNE

Jialan Wang, le 17 janvier 2019

«Caractérisation et quantification métrologique de nano-objets d'origine anthropique et naturelle en Ile de France».

Mohamed Ouamer, le 18 janvier 2019

«Conception, modélisation et étalonnage d'un shunt pour la mesure de courant à 10 A et 1 MHz».

Zied Elloumi, le 18 mars 2019

«Prédiction de performances des systèmes de Reconnaissance Automatique de la Parole».

Thi Dao Pham Bui, le 12 septembre 2019

«Conception et développement d'étalons pour la mesure des paramètres S en mode mixte de circuits intégrés et méthodes associées».

Deepak Amaripadath, le 22 novembre 2019

«Development of Tools for Accurate Study of Supraharmonic Emissions in Smart Grids».

Yassir Arezki, le 5 décembre 2019

«Algorithmes de références robustes pour la métrologie dimensionnelle des surfaces asphériques et des surfaces complexes en optique».

### LNE-LNHB

Riham Mariam, le 12 avril 2019

«Détermination des intensités absolues d'émission XL d'actinides à l'aide d'un calorimètre métallique magnétique de haute résolution».

### LNE-SYRTE

Mengzi Huang, le 17 septembre 2019

«Spin squeezing and spin dynamics in a trapped-atom clock».

Romain Karcher, le 15 octobre 2019

«Implémentation d'une source d'atomes ultra-froids pour l'amélioration de l'exactitude d'un gravimètre atomique».

Romain Caldani, le 18 octobre 2019

«Interféromètres atomiques pour la mesure simultanée de g et son gradient vertical».

Matteo Altorio, le 4 décembre 2019

«Novel atom interferometry techniques for a cold-atom gyroscope of large Sagnac area».

Valentin Cambier, le 6 décembre 2019

«Horloge à réseau optique à atomes de mercure exploitant un 2D-MOT : Durée de vie de l'état 3P0 et mesures de fréquence».

Nicolas Galland, le 20 décembre 2019

«Vers des systèmes opto-mécaniques et mesures de haute précision à base de cristaux dopés aux terres rares» ■

# LE RÉSEAU NATIONAL DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE

## LES LABORATOIRES NATIONAUX DE MÉTROLOGIE

### LNE-LCM/LNE-Cnam

Le Laboratoire commun de métrologie rassemble des chercheurs du LNE et du Conservatoire National des Arts et Métiers. Le LNE-LCM/LNE-Cnam intervient pour les domaines en métrologie des longueurs, rayonnements optiques, température et grandeurs thermiques, masse et grandeurs apparentées (pression, force, couple, acoustique, accélérométrie, viscosité).

### LNE

Le LNE, en charge des domaines tels que l'électricité - magnétisme, la métrologie chimique et les mathématiques et statistiques, en sus des activités propres au LCM.

### LNE-LNHB/CEA

Laboratoire National Henri Becquerel au Commissariat à l'Energie Atomique, chargé de la réalisation des références dans le domaine des rayonnements ionisants, i.e. la dosimétrie et la radioactivité.

### LNE-SYRTE/OP

Laboratoire des Systèmes de Référence Temps-Espace à l'Observatoire de Paris, chargé de la réalisation des références dans le domaine du temps et des fréquences.

## LES LABORATOIRES ASSOCIÉS AU LNE

### LNE-CETIAT

Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques, le LNE-CETIAT, pour l'hygrométrie, la débitmétrie liquide-eau et l'anémométrie.

### LNE-ENSAM

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris, pour la pression dynamique.

### LNE-IRSN

L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, le LNE-IRSN, pour la dosimétrie des neutrons.

### LNE-LADG

Laboratoire Associé de Débitmétrie Gazeuse, le LNE- LADG, pour la débitmétrie gazeuse.

### LNE-LTFB

Le Laboratoire Temps Fréquence de Besançon est en charge du transfert des références de temps et de fréquence, en particulier pour les mesures de densité spectrale de phase et les stabilités de temps et de fréquences.

### LNE-TRAPIL

Le laboratoire de la Société Trapil est responsable des références en débitmétrie des hydrocarbures liquides.

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

Rédaction : Mathieu Grousseau / LNE - Réalisation : LNE  
Crédits photos : Philippe Stroppa : p. 3, 14, 15, 17, 20, 21, 26, 27, 30, 31, 32, 38 - Guillaume Grandin : p. 23, 34 - LNE : p. 1, 12, 16, 18, 29, 36, 37, 40 - LNE-Cnam : p. 10, 11 - LNE-SYRTE : 13, 28 - LNE-CETIAT : p. 25 - Jean-Paul Bounine : p. 22 - Adobe Stock : p. 33 - DR

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

lne.fr



CRÉER  
LA  
CONFIANCE