



RAPPORT RECHERCHE  
2020

LA RECHERCHE  
AU LNE EN 2020,  
C'EST :

25 %  
du budget global du LNE

120 projets de recherche  
dont 54 JRP *(Joint Research Project)*

92 publications dans des revues  
à comités de lecture

18 doctorants

200 docteurs  
et ingénieurs

Un portefeuille  
de 17 brevets

LA RECHERCHE  
DU RNMF EN 2020,  
C'EST :

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

183 publications dans des revues  
à comités de lecture

43 thèses  
dont 5 soutenues en 2020  
et 1 nouvelle HDR  
*(Habilitation à Diriger les Recherches)*

## ÉDITORIAL

Thomas GRENON,  
Directeur général



Malgré une année 2020 complexe, le LNE et les laboratoires du Réseau national de la métrologie française sont parvenus à poursuivre leur recherche d'excellence. De nombreux projets européens portant sur des enjeux sociétaux majeurs tels que la mesure de la qualité de l'air, la métrologie de l'hydrogène ou l'isolation des bâtiments sont ainsi arrivés à terme.

Cette année plus que jamais, la santé a été au cœur des préoccupations de chacun, et le LNE a su démontrer l'importance d'une recherche en métrologie forte pour la société. Grâce à une expertise en métrologie des aérosols développée depuis de nombreuses années, le LNE a ainsi su mettre à profit ses compétences pour évaluer les performances de filtration des masques. L'activité du LNE dans le domaine de la santé a également été marquée en 2020 par des travaux sur les maladies cardiovasculaires et les vésicules extracellulaires. Deux chercheurs du LNE œuvrant à la protection de nos concitoyens à travers leurs travaux sur la maladie d'Alzheimer ou sur la qualité de l'air ont été récompensés par le Prix LNE de la recherche 2020.

Les travaux menés cette année par les équipes du LNE et du RNMF ont aussi montré le rôle de la métrologie dans le soutien à l'innovation grâce à des recherches sur les technologies de demain telles que l'hydrogène, l'intelligence artificielle, l'électronique mobile de type 5G et sa consommation énergétique, ou encore les horloges atomiques dans l'optique d'une redéfinition future de la seconde.

Je vous invite à découvrir plus en détail nombre de ces réalisations dans les pages qui suivent. ■

# SOMMAIRE

<b>Éditorial</b> .....	<b>3</b>
<hr/>	
<b>Environnement et énergie : contribuer à un monde durable</b> .....	<b>6</b>
• Suies de carbone atmosphériques : leur concentration tracée au SI .....	7
• Le dioxyde d'azote désormais directement disponible .....	8
• La métrologie pour l'hydrogène en marche .....	8
• Les mesures de résistance thermique des bâtiments accèdent à la précision métrologique .....	9
• Isolation des bâtiments : l'émissivité thermique des matériaux mieux pris en compte .....	10
<b>Santé : garantir la sécurité des citoyens</b> .....	<b>12</b>
• Évaluation des risques cardiovasculaires : vers des méthodes de diagnostic plus fines .....	13
• Vésicules extracellulaires : une métrologie pour le diagnostic médical en ligne de mire .....	13
• Prix LNE de la recherche 2020 : Vincent Delatour et François Gaie-Levrel récompensés pour leurs travaux au service la santé .....	14
• Radon et thoron : des références pour les faibles activités .....	16
• Emballages alimentaires : les challenges de demain .....	17
<b>Industrie : accompagner l'innovation</b> .....	<b>18</b>
• Graphène : une métrologie dédiée pour accélérer les applications .....	19
• Les propriétés thermiques des matériaux faiblement conducteurs désormais accessibles aux plus petites échelles .....	20
• Éclairage routier : la sécurité et la consommation dans le viseur de la métrologie .....	21
• Intelligence artificielle, le LNE désormais incontournable .....	22
• Le rail européen unifié par la métrologie .....	23
• Électronique mobile : une métrologie pour relever le défi de la consommation énergétique .....	23
• Très basses pressions : la sensibilité des jauges à ionisation à la hausse .....	24
• L'incertitude prise en compte dans les processus industriels .....	24

<b>Métrologie fondamentale et dissémination du SI</b> .....	<b>26</b>
• Données atomiques et nucléaires : leur mesure et leur évaluation assurées dans la durée .....	27
• Étalon de pression : le pascal est désormais quantique .....	28
• Gravimétrie : le poids du LNE-SYRTE renforcé .....	28
• La seconde optique bientôt au-delà des limites quantiques .....	29
• Des terres rares pour améliorer la stabilité des horloges optiques .....	30
• Géodésie : une précision submillimétrique en ligne de mire .....	30
<hr/>	
<b>Programme EMPIR : la métrologie européenne au service de la société</b> .....	<b>32</b>
<hr/>	
<b>Ampère à l'honneur en 2020</b> .....	<b>36</b>
<hr/>	
<b>Habilitation à Diriger les Recherches, thèses de doctorat soutenues et distinction</b> .....	<b>37</b>
<hr/>	
<b>Le réseau national de la métrologie française</b> .....	<b>38</b>



PLATEFORME EXPÉRIMENTALE POUR L'ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE MICRO-CAPTEURS POUR LA QUALITÉ DE L'AIR.

## ENVIRONNEMENT ET ÉNERGIE : CONTRIBUER À UN MONDE DURABLE

Pollution, suivi du changement climatique, transports de demain, isolation des bâtiments, énergies renouvelables, le LNE et la métrologie française sont des partenaires indispensables pour élaborer et mettre en place des solutions durables.

## SUIES DE CARBONE ATMOSPHÉRIQUES : LEUR CONCENTRATION TRACÉE AU SI

**Le carbone suie contribue pour une part importante au changement climatique et à la pollution. De nouveaux étalons vont accroître la justesse de sa mesure dans l'air ambiant.**

La surveillance de l'atmosphère revêt d'importants enjeux climatiques et sanitaires, en particulier concernant la contribution particulière de carbone suie. Issus de l'industrie, du transport et plus globalement des processus de combustion, ces aérosols pèsent en effet lourd dans le forçage radiatif à l'origine de plusieurs centaines de milliers de morts prématurés chaque année en Europe.

Depuis plusieurs décennies, des techniques optiques permettent d'assurer le suivi des concentrations en carbone suie atmosphérique. Néanmoins les mesures souffrent d'écarts allant jusqu'à 30 % selon les instruments utilisés et d'une absence de traçabilité au SI avec des conséquences sur la comparabilité et l'interprétation des données.

Terminé en 2020, le projet européen BlackCarbon, auquel le LNE a participé aux côtés de 9 partenaires de 6 pays, avait pour ambition d'y mettre bon ordre.

Enjeu majeur : le développement d'équipements et de méthodologies permettant d'étalonner les différents types d'appareils de mesure de la concentration massique de carbone suie dans l'atmosphère. « Concrètement, il s'agissait pour les partenaires de développer plusieurs aérosols de référence de carbone suie, représentatifs de l'air ambiant, de les caractériser en termes de stabilité, de reproductibilité et de propriétés physico-chimiques et de les tester lors de comparaisons inter-laboratoires impliquant chaque partenaire », explique François Gaie-Levrel, du LNE.

De leur côté, les métrologues du LNE ont développé trois générateurs d'aérosols candidats. Le premier et le second permettent la nébulisation d'aérosols à partir de suspensions de graphite colloïdal et de billes de billes de latex de polystyrène noires. Le troisième met en œuvre deux électrodes de graphite entre lesquelles une décharge électrique est créée pour permettre la désorption de particules de carbone avant leur transport dans un gaz vecteur. Après optimisation de leurs instruments, les scientifiques ont montré que ces générateurs permettent de produire de manière reproductible des aérosols d'analogie de suie caractérisés par des diamètres moyens de  $179 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$  ;  $187,8 \text{ nm} \pm 0,2 \text{ nm}$  et  $38 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$  avec des concentrations massiques de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ;  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $68 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivement.

Dans une seconde phase, les laboratoires impliqués dans le projet ont comparé les différentes solutions techniques proposées pour générer ces aérosols. Objectif : définir collectivement lesquels retenir comme références métrologiques selon la gamme des tailles particulières considérée, de même qu'en fonction de l'état « frais » ou « âgé », c'est-à-dire altéré ou pas par une phase organique de leurs suies de synthèse. « En ce début d'année 2021, nous sommes en train de finaliser ce travail de synthèse », précise François Gaie-Levrel. Après quoi, les nouvelles références pourront être disséminées à l'échelle européenne en vue d'une surveillance harmonisée du carbone suie dans l'atmosphère avec une incertitude cible de 10 %. ■

### BIENTÔT UN RÉSEAU EUROPÉEN POUR LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

Eau, air, sol : la pollution ne fait aucune différence. D'où la nécessité d'une surveillance intégrée de tous les compartiments de notre environnement, dans une approche pluridisciplinaire, multipolluant et harmonisée à l'échelle de l'Europe. C'est le sens du projet POLMO, coordonné par le LNE et regroupant neuf instituts nationaux de métrologie européens, qui démarre cette année pour trois ans. Son objectif ? Créer un réseau européen métrologique de surveillance de l'environnement au plus tard mi-2022. Comme l'explique Raphaël Maillard, coordinateur du projet, « ce réseau aura pour objectif de mettre sur pied un agenda stratégique de recherche pour et en très forte interaction avec les bénéficiaires et utilisateurs finaux, d'optimiser les ressources des différents instituts, et de mieux disséminer les fruits de leurs travaux de recherche ». De quoi offrir également aux utilisateurs finaux un « guichet unique » de référence, quels que soient leurs besoins : matériaux ou méthodes de référence, guides de bonnes pratiques... au plus prêt des besoins du terrain. ■



GÉNÉRATEUR PORTABLE POUR LA PRODUCTION D'AÉROSOLS MODÈLES DE CARBONE SUIE

## LE DIOXYDE D'AZOTE DÉSORMAIS DIRECTEMENT DISPONIBLE

Le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) est un polluant atmosphérique majeur et fait l'objet d'exigences environnementales définies par la Directive européenne 2008/50/CE. Pour autant, la mesure du NO<sub>2</sub> est réalisée de manière indirecte via la transformation du NO<sub>2</sub> en monoxyde d'azote (NO) qui est ensuite mesuré par la méthode de chimiluminescence, d'où de possibles biais analytiques. Afin de contribuer à la mise en place d'une nouvelle infrastructure métrologique complète affectée à la mesure directe du NO<sub>2</sub>, les chimistes du LNE ont participé au projet européen MetNO<sub>2</sub> qui s'est achevé l'année dernière. Dans ce cadre, les métrologues ont développé différents étalons de référence. Pour des fractions molaires en NO<sub>2</sub> de l'ordre de 1 µmol/mol, ils ont opté pour des étalons statiques, à savoir des mélanges gazeux en bouteille dont chaque constituant est pesé avec une très grande précision afin d'obtenir de très faibles incertitudes. Comme l'explique Tatiana Macé, du

LNE, «le plus gros défi a consisté à déterminer précisément le contenu en impuretés de nos mélanges gazeux (NO<sub>y</sub>, HNO<sub>3</sub>, vapeur d'eau), ce que nous avons fait à l'aide d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier couplé à une cellule optique présentant un trajet optique de 60 m.»

En revanche, pour les fractions molaires de quelques nmo/mol, les scientifiques ont développé des étalons dynamiques par perméation. Ils consistent en un gaz s'échappant d'un tube à travers une membrane perméable, transporté ensuite par un gaz vecteur. Grâce à ces étalons dynamiques, le LNE a notamment caractérisé un générateur dynamique transportable de mélanges gazeux contenant du NO<sub>2</sub> mis au point par le partenaire suisse, le METAS.

L'ensemble du projet devrait ainsi garantir des mesures directes de la concentration atmosphérique en dioxyde d'azote avec une incertitude de l'ordre de 15 %. ■

## LA MÉTROLOGIE POUR L'HYDROGÈNE EN MARCHÉ

Le développement de la voiture à hydrogène est l'une des composantes de la décarbonation du secteur des transports. Pour l'accélérer, la mise en place d'une métrologie associée est indispensable. C'était l'objet du projet européen MetroHyVe qui a regroupé vingt partenaires de neuf pays, dont le LNE, et qui s'est achevé l'année dernière.

«On est parti d'une feuille blanche, tout était à faire», résume Rémy Maury, au LNE-LADG. Parmi les multiples enjeux associés au projet, les métrologues français se sont en particulier attachés à développer un banc d'étalonnage transportable pour les débitmètres Coriolis utilisés dans les stations de ravitaillement. Ceux-ci n'étaient en effet pas reliés au Système international d'unités, aux pressions d'utilisation de l'hydrogène pour la mobilité, soit environ 700 bars.

Précisément, les chercheurs ont opté pour un système par gravimétrie, soit une balance sur laquelle est pesé l'hydrogène à haute pression introduit dans le réservoir d'une automobile. Comme l'indique le scientifique, «L'hydrogène est un gaz très léger, il nous a donc fallu mettre au point un système de très haute précision et aux conditions d'utilisation parfaitement contrôlées, tout en intégrant des contraintes de sécurité – l'hydrogène est inflammable – ainsi que celles liées à la formation de givre lors des décompressions.»

A la clé, une incertitude relative de mesure de 0,3 %, conforme aux prescriptions des normes en vigueur. Et un beau succès pour MetroHyVe dans son ensemble, dont un second volet vient de commencer sur les usages dits lourds de l'hydrogène : camions et bus. ■



## LES MESURES DE RÉSISTANCE THERMIQUE DES BÂTIMENTS ACCÈDENT À LA PRÉCISION MÉTROLOGIQUE

La rénovation thermique d'un bâtiment nécessite de mesurer en amont la performance énergétique de ses parois. Le LNE et ses partenaires ont développé un démonstrateur adapté à cet objectif.

La rénovation thermique des bâtiments est une composante essentielle des efforts à fournir en vue de limiter la consommation d'énergie et le réchauffement climatique. Afin d'appliquer de justes préconisations avant travaux, il est nécessaire de déterminer la résistance thermique des parois à isoler. Aujourd'hui, cela ne peut se faire qu'à l'échelle d'un bâtiment et ce de manière indirecte à partir des données de consommation d'énergie globale. D'où des estimations très imprécises. Pour faire mieux, les chercheurs du LNE ont participé au projet RESBATI, financé par l'ANR et finalisé au début de cette année, qui visait à la mise au point d'un démonstrateur pour la mesure directe de la résistance thermique d'une paroi, qui soit adapté aux besoins des utilisateurs.

Sur le papier, le principe est simple : il suffit de chauffer la face isolée de la paroi et, une fois le régime thermique stabilisé, de mesurer le flux de chaleur apporté et les températures sur les deux faces de la paroi pour déterminer la grandeur recherchée, le pouvoir isolant de la paroi. Ainsi, le résultat prend la forme d'un instrument composé d'une plaque chauffante de 60 cm de côté à appliquer contre la paroi, et d'un automate programmable qui enregistre les données nécessaires au calcul de la résistance thermique inconnue.

À ceci près qu'en pratique, plusieurs jours sont nécessaires pour atteindre le régime stationnaire permettant la mesure, soit un délai incompatible avec une utilisation en routine d'un tel appareil. Pour pallier cette difficulté, les ingénieurs ont développé une méthode d'identification dite bayésienne. Elle consiste à ajuster les données expérimentales évolutives suivant des prescriptions mathématiques complexes

faisant appel au hasard, ce qui permet de ramener le temps de mesure à quelques heures seulement.

Une fois le prototype réalisé, les chercheurs du LNE ont étalonné le dispositif de mesure. Pour ce faire, ils ont qualifié des échantillons de différents modèles de paroi avec les moyens de mesure primaire du laboratoire. Ils ont également réalisé des mesures sur des parois entières. Résultat : des mesures obtenues avec une incertitude autour de 10 % pour des parois dont la résistance thermique est inférieure à 4 m<sup>2</sup>·K·W<sup>-1</sup>. «Cela correspond typiquement aux valeurs observées pour des parois construites jusque dans les années 1990, soit typiquement dans les bâtiments qu'il convient de rénover aujourd'hui», indique Alain Koenen, au LNE.

Mieux, les chercheurs ont également testé leur démonstrateur directement chez des particuliers souhaitant réaliser des travaux d'isolation de leur habitation. Ils se sont ainsi assurés qu'il répondait bien aux besoins. «Nous avons montré qu'il était possible d'obtenir une valeur pertinente après seulement quelques heures de mesure», ajoute le métrologue.

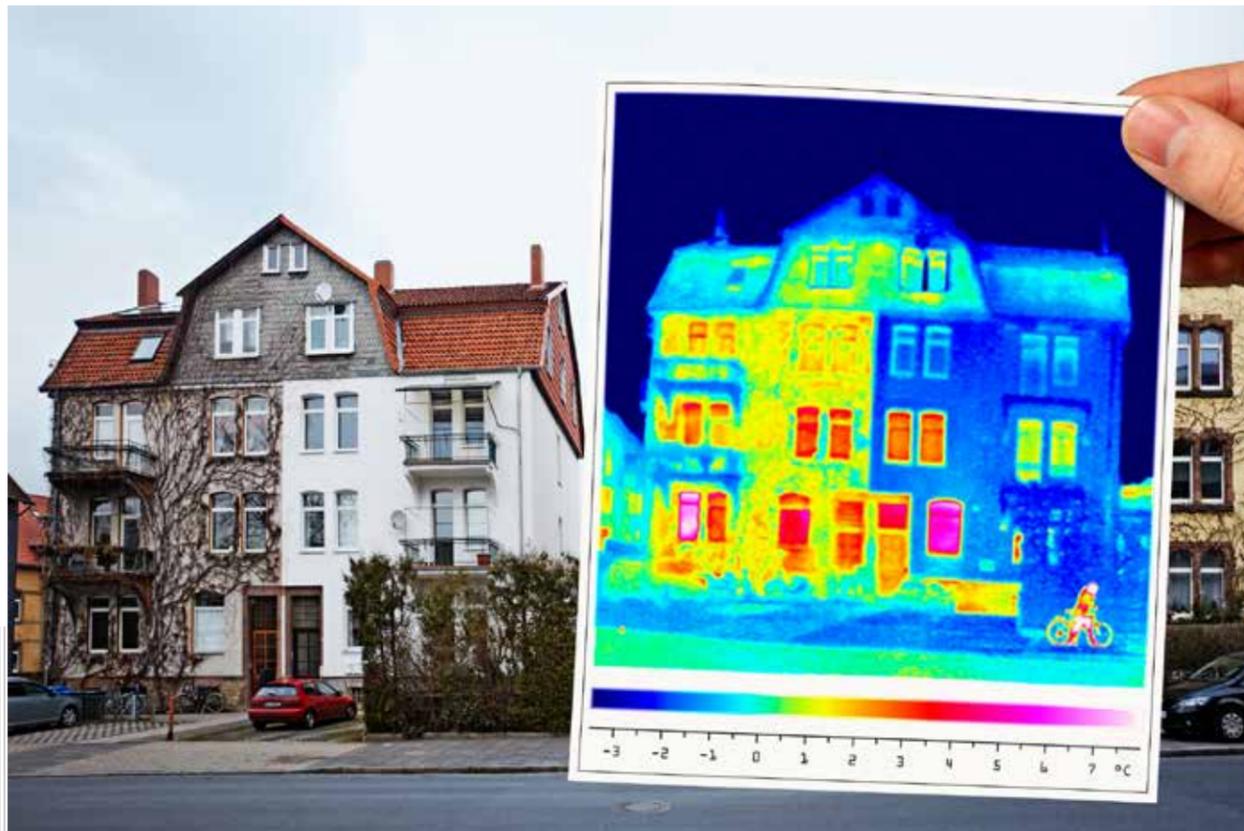
Au terme du projet, tout est donc prêt pour passer à une phase opérationnelle. De leur côté, les spécialistes du LNE poursuivent leurs travaux afin d'adapter leur méthodologie à des panneaux de plus grande résistance thermique. Pour ce faire, ils projettent d'optimiser l'algorithme de traitement des données de mesure. Celles-ci devront par ailleurs être prises en plusieurs points et non plus en un seul de chaque côté de la paroi. La rénovation énergétique des bâtiments entrera alors de plein pied dans l'ère de la précision métrologique. ■



PLAQUE CHAUFFANTE AVEC CAPTEUR DE FLUX.

### MPEB : LA MÉTROLOGIE DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES À L'USAGE DES INDUSTRIELS

Comment diffuser auprès des industriels et des acteurs du marché des matériaux les connaissances en métrologie des performances énergétiques des bâtiments, en phase avec les réalités du terrain ? C'était l'enjeu du projet MPEB, finalisé cette année, auquel a participé le LNE sous l'égide de la Fondation Bâtiment Énergie. Dans ce cadre, les métrologues ont préparé plusieurs documents de synthèse rappelant les bases de la métrologie (notions de mesure, d'incertitude...) et détaillant l'ensemble des méthodes existantes aujourd'hui pour accéder aux propriétés thermiques d'un bâtiment. Les chercheurs ont par ailleurs mené une vaste enquête auprès des acteurs concernés afin de répondre au mieux à leurs attentes. Le fruit de leur travail a également fait l'objet de plusieurs webinaires et d'un grand colloque de restitution en mars 2020. ■



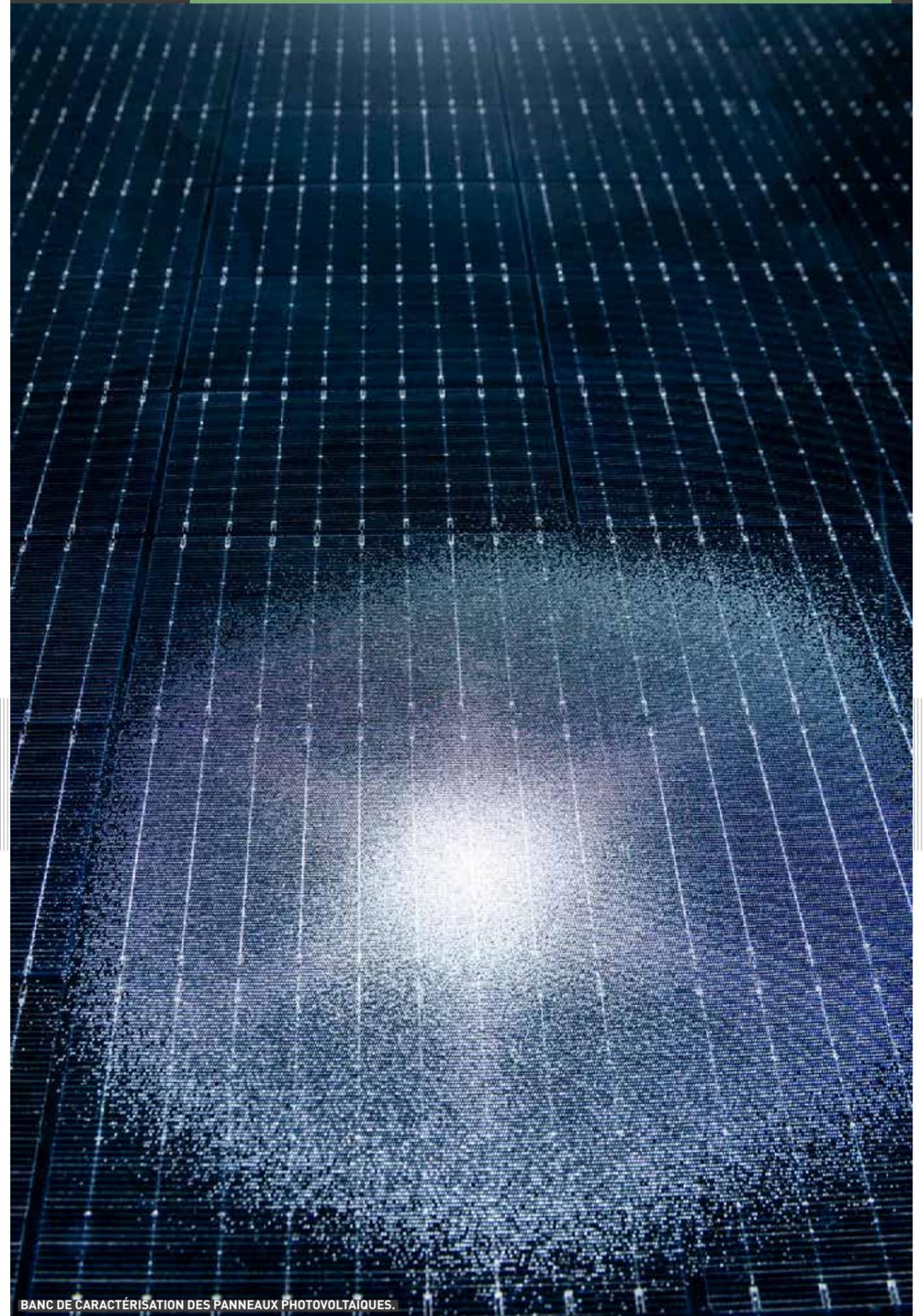
## ISOLATION DES BÂTIMENTS : L'ÉMISSIVITÉ THERMIQUE DES MATÉRIAUX MIEUX PRIS EN COMPTE

L'émissivité thermique d'un matériau caractérise sa propension à émettre ou absorber le rayonnement infrarouge. Sa connaissance est indispensable pour calculer les performances énergétiques d'un bâtiment. Or dans le cas des matériaux dits de faibles émissivité – dont l'émissivité est inférieure à 0,1 – utilisés comme isolants thermiques, des écarts du simple au quadruple étaient constatés dans la mesure de cette propriété selon le laboratoire considéré et la technique de mesure.

Pour y mettre bon ordre et accompagner l'évolution de la réglementation, le LNE a coordonné pendant trois ans le projet européen EMIRIM, en collaboration avec neuf partenaires de cinq pays. Pour leur part, les métrologues français ont procédé à l'amélioration de leur installation de mesure calorimétrique. Elle permet de déterminer l'émissivité d'un matériau à partir

de mesure de la puissance électrique nécessaire au maintien de sa température à une valeur donnée. Comme le détaille Jacques Hameury, au LNE, « nous avons développé et installé un nouveau système de chauffage permettant la mise en œuvre d'échantillons plus grands, gagnant ainsi en précision. Nous avons également revu la prise en compte de différents types de perturbations thermiques. »

Résultat : le LNE dispose désormais d'un banc permettant la réalisation de mesures dont l'incertitude relative est inférieure à 0,02. Celui-ci pourra être mis à profit pour mesurer l'émissivité des matériaux de référence utilisés par les industriels pour l'étalonnage de leurs moyens de mesure, partant d'une situation où beaucoup d'utilisateurs réalisaient des mesures sans aucune traçabilité au Système international. ■



BANC DE CARACTÉRISATION DES PANNEAUX PHOTOVOLTAIQUES.



ANALYSE PAR CHROMATOGRAPHIE EN PHASE GAZEUSE.

## SANTÉ : GARANTIR LA SÉCURITÉ DES CITOYENS

Nos sociétés font face à d'importantes problématiques de santé. Le LNE et la métrologie française contribuent au développement de nouveaux traitements et de nouvelles techniques diagnostiques, sans omettre le volet prévention.

## ÉVALUATION DES RISQUES CARDIOVASCULAIRES : VERS DES MÉTHODES DE DIAGNOSTIC PLUS FINES

Les maladies cardiovasculaires sont responsables de 1,8 millions de décès chaque année en Europe. Pour y faire face, il est nécessaire de disposer de méthodes fiables permettant d'estimer les risques chez les patients. Actuellement, le risque de développer des maladies cardiovasculaires est évalué par le dosage de biomarqueurs dans le sang. Néanmoins, la traçabilité de ces méthodes n'est pas aujourd'hui optimale. Pour l'améliorer, le LNE participe depuis 2019 aux côtés de 12 partenaires au projet européen CardioMet.

Récemment, des travaux ont démontré l'intérêt de doser non pas uniquement la partie lipidique des lipoprotéines (transporteurs du cholestérol dans le sang) incriminées dans la survenue des accidents cardio-vasculaires, mais également leur partie protéique. Ainsi l'un des objectifs de CardioMet consiste à développer des méthodes de référence d'ordre supérieur pour le dosage de ces molécules appelées apolipoprotéines et d'évaluer leur valeur ajoutée par rapport aux tests conventionnels.

Dans ce cadre, le LNE a pour tâche de préparer des matériaux de référence primaire traçables au Système international d'unités pour l'étalonnage de ces méthodes. «*Il s'agira d'échantillons contenant des peptides, c'est-à-dire les briques chimiques dont sont constituées les protéines, à concentration garantie par spectroscopie de référence*», explique Vincent Delatour, du LNE.

Grâce à ces étalons et ces méthodes de référence, il sera alors possible de raccorder au SI les résultats fournis par les méthodes de dosage utilisées dans les laboratoires de biologie médicale et les hôpitaux, ce qui permettra d'évaluer et d'améliorer leur comparabilité et leur fiabilité. ■



SPECTROMÉTRIE DE MASSE À HAUTE RÉOLUTION POUR LE DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES DE RÉFÉRENCE POUR LE DOSAGE DE BIOMARQUEURS.

## VÉSICULES EXTRACELLULAIRES : UNE MÉTROLOGIE POUR LE DIAGNOSTIC MÉDICAL EN LIGNE DE MIRE

Les vésicules extracellulaires sont des entités nanométriques libérées par les cellules présentant un haut potentiel comme biomarqueurs de maladies tel le cancer. Néanmoins, cette application diagnostique nécessite le développement d'une métrologie permettant de garantir la fiabilité des mesures au sein des fluides biologiques. C'est l'enjeu du projet METVES 2, démarré en 2019, auquel le LNE participe sous deux aspects. Le premier consiste à développer une méthode de référence pour la caractérisation en taille et en nombre de nanoparticules de silice creuses contenues au sein de l'un des trois matériaux synthétiques de référence développés dans le cadre du projet. Ceux-ci serviront pour l'étalonnage des dispositifs de mesures utilisés dans les laboratoires d'analyses médicales. Pour ce faire, les métrologues français ont opté pour une méthode de spectrométrie de masse en mode particule unique. Comme le détaille Johanna Noireaux, au LNE, «*nos travaux mettent un*

*accent particulier sur la réduction des contaminations en silice et sur l'amélioration des méthodes d'injection des échantillons afin d'augmenter la sensibilité du dispositif et permettre l'analyse de particules de taille réduite.*»

De son côté, Enrica Alasonati, elle aussi au LNE, démarrera prochainement la caractérisation d'échantillons biologiques contenant des vésicules extracellulaires par une approche analytique dite de fractionnement par couplage flux-force. Elle consiste à séparer des particules de tailles différentes au sein d'un écoulement du fait de vitesses de diffusion différentes. On accède alors à la distribution en taille des particules par des méthodes de détection optiques. Avantage : «*Non destructive, cette méthode sera aussi utilisée pour séparer et collecter des échantillons afin de permettre des mesures complémentaires hors ligne*», explique la scientifique. ■

## PRIX LNE DE LA RECHERCHE 2020 : VINCENT DELATOUR ET FRANÇOIS GAIE-LEVREL RÉCOMPENSÉS POUR LEURS TRAVAUX AU SERVICE DE LA SANTÉ

En vous récompensant cette année, le LNE témoigne de l'importance qu'occupe en son sein la recherche en métrologie au service de la santé, et ce dans des domaines très divers comme l'illustrent vos spécialités respectives. Vincent Delatour et François Gaie-Levrel, pouvez-vous commencer par vous présenter ?



VINCENT  
DELATOUR

**Vincent Delatour :** Je suis expert en analyse de biomarqueurs. Mon activité a pour objectif d'améliorer la fiabilité et la comparabilité des examens en biologie médicale. Pour ce faire, notre équipe développe des matériaux de référence certifiés (MRC) et des méthodes de référence pour le dosage des biomarqueurs dans le but d'améliorer le diagnostic des patients et de rationaliser les dépenses de santé.

### Quel sont plus précisément vos profils de chercheur ?

**Vincent Delatour :** Dès mes études secondaires, j'ai eu le goût des sciences du vivant. J'ai ainsi fait une école d'ingénieurs avec une option en biotechnologie, puis un doctorat à l'interface de la biophysique et de la biochimie pour étudier les mécanismes permettant aux métastases cancéreuses de se déplacer. J'ai été recruté au LNE en 2008 pour mes compétences en biologie afin de faire le lien entre les métrologues et les médecins.

Dans mon travail, j'apprécie d'être à l'interface de trois disciplines : la médecine, la bio-analyse et la métrologie. La première amène des questions concrètes au plus près des besoins des patients, la deuxième des moyens pour y répondre, et la troisième garantit la qualité des dosages réalisés pour établir le diagnostic et le suivi des patients. C'est cette synergie qui in fine concourt à l'utilité de ce que nous faisons.

**François Gaie-Levrel :** J'ai une formation universitaire de physico-chimiste avec une spécialité en environnement atmosphérique. Durant ma thèse, j'ai développé, caractérisé et validé un instrument dédié à l'analyse en temps réel d'aérosols organiques atmosphériques. Cette spécialisation doctorale dans le domaine des aérosols atmosphériques m'a également permis de me sensibiliser à la métrologie, dimension de mon activité qui a pris tout son sens à la suite de mon recrutement au LNE début 2012.

Au sein du LNE, j'apprécie l'éventail très large des applications de mes recherches, que ce soit pour des études associées à la pollution atmosphérique, à la combustion, à l'industrie, au nano-bioparticules ou celui de la santé de travailleurs.



FRANÇOIS  
GAIE-LEVREL

**François Gaie-Levrel :** Comme spécialiste en métrologie des aérosols, mes travaux de recherche ont pour objectif de proposer des méthodes robustes, fiables et traçables de caractérisation d'aérosols pour des problématiques environnementales, industrielles et/ou sanitaires. A ce titre, je joue un rôle d'expert dans plusieurs groupes de travail et notamment au sein du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA).

### Pouvez-vous décrire un projet qui vous tient particulièrement à cœur et qui illustrerait votre manière de travailler ?

**Vincent Delatour :** Je pense à un projet récent, financé par l'association France Alzheimer, sur la protéine Tau, un biomarqueur de la maladie d'Alzheimer. Il est intéressant car à la fois orienté au plus près des besoins des patients et en même temps très amont, donc permettant de mettre à profit toutes les facettes de notre activité.

Concrètement, il ne s'agissait pas seulement de travailler à la fiabilisation des mesures de biomarqueurs déjà bien établis, mais d'en identifier des nouveaux, de mettre en place des



SPECTROMÉTRIE DE MASSE À HAUTE RÉOLUTION POUR  
LE DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES DE RÉFÉRENCE  
POUR LE DOSAGE DE BIOMARQUEURS.



PLATEFORME EXPÉRIMENTALE POUR L'ÉVALUATION  
DES PERFORMANCES DE MICRO-CAPTEURS  
POUR LA QUALITÉ DE L'AIR.

méthodes pour les doser et enfin de fiabiliser ces dernières d'un point de vue métrologique.

J'ajouterais que dans le domaine de la métrologie pour la santé, travailler sur la « standardisation » de biomarqueurs innovants permet de convaincre plus facilement les industriels d'utiliser nos outils métrologiques, plutôt que de faire évoluer quelque chose qui existe déjà en routine mais qui doit être amélioré. On a donc ainsi plus de chance de valoriser des résultats de la recherche d'un point de vue industriel ou de réussir un transfert technologique pour répondre à un besoin industriel.

**François Gaie-Levrel :** Comme passionné des aérosols en général, il est très difficile de répondre à cette question. Mais on peut sans doute citer notre implication récente dans la lutte contre la pandémie associée à la Covid-19. Ainsi, dès le début de la crise sanitaire, nous avons été mobilisés pour répondre à cette problématique centrale qu'est l'évaluation des performances de filtration des masques de protection respiratoire. Pour ce faire, en nous appuyant sur nos compétences en métrologie des aérosols et sur notre expérience liée aux nombreux projets de recherches connexes, nous avons mis au point un banc d'essai sur lequel nous avons testé plusieurs centaines de masques depuis début 2020. Ce projet illustre notamment très bien la façon dont des compétences développées dans un cadre de recherche peuvent être ensuite mobilisées pour répondre à un besoin concret.

### Ce goût partagé pour les travaux de recherche au service de la santé vous a conduit récemment à travailler sur un projet commun. De quoi s'agit-il ?

**Vincent Delatour :** Il s'agit d'un projet sur la mesure du risque cardio-vasculaire. Celui-ci est principalement déterminé à partir de différents facteurs de risque (âge, sexe, hypertension, tabagisme...), l'un d'entre eux étant l'excès de cholestérol. Le dosage du cholestérol contenu dans les lipoprotéines de haute et de basse densité (improprement appelé bon et mauvais cholestérol) permet d'estimer indirectement la concentration de ces transporteurs du cholestérol dans le sang. Or, des études ont montré que la taille et la concentration en nombre des lipoprotéines constituent de meilleurs estimateurs du risque cardio-vasculaire, plus que le cholestérol en tant que tel. C'est autour de cette thématique que s'est nouée une collaboration entre François et moi-même.

### Pour quelle raison précisément ?

**François Gaie-Levrel :** Les lipoprotéines sont des nanoparticules biologiques. L'identification de travaux menés par une équipe américaine, sur leur caractérisation en termes de concentration en nombre et de taille de lipoprotéines en utilisant un SMPS (scanning mobility particle sizer) couplé à un générateur électro-spray, s'est avérée être le point de départ de notre collaboration avec Vincent étant donné que nous utilisions déjà ces techniques au LNE dans le cadre de nos propres travaux. Vincent m'a donc proposé que nous travaillions ensemble afin d'évaluer cette technique en tant que possible méthode de référence pour le dosage des lipoprotéines comme biomarqueur du risque cardio-vasculaire.

### Et alors ?

**Vincent Delatour :** Le SMPS distingue des objets de tailles différentes, sans identification chimique spécifique associée. Or le sérum sanguin étant un milieu extrêmement complexe ; nous avons dû développer des outils biochimiques permettant d'isoler les lipoprotéines en amont de leur caractérisation.

**François Gaie-Levrel :** Il a également fallu mettre en œuvre un important développement instrumental permettant le comptage des lipoprotéines par SMPS à partir d'échantillons nébulisés en phase aérosol. A quoi s'est ajouté tout le développement métrologique permettant de remonter, à partir d'un comptage en phase aérosols, à une concentration particulière dans le sérum humain pour une classe de taille de lipoprotéine, à savoir les LDL.

### Le résultat a-t-il été concluant ?

**François Gaie-Levrel :** Nous avons démontré une très bonne faisabilité de la méthode, même si nous avons également mis en évidence son caractère très chronophage en termes de besoin d'étalonnage journalier.

**Vincent Delatour :** De manière très positive, nous avons montré qu'une technique qui n'a pas été pensée pour répondre à une problématique de dosage de biomarqueurs peut néanmoins être mise à profit pour ce faire. Néanmoins, nous sommes parvenus à la conclusion que le SMPS couplé à un générateur électro-spray n'est pas la technique la mieux adaptée pour devenir la méthode de référence « ultime » pour un comptage absolu des lipoprotéines.

### N'est-ce pas un peu décevant ?

**Vincent Delatour :** On ne peut pas dire ça. Nous avons réalisé ce travail dans le cadre d'un projet européen qui nous a conduit à organiser à une intercomparaison visant à définir quelle technique aurait le meilleur potentiel pour devenir une méthode de référence pour le comptage des lipoprotéines. In fine, il s'avère que ce serait plutôt la spectroscopie de masse qui fait désormais l'objet d'un nouveau projet européen pour lequel nous allons réaliser des matériaux de référence. Ainsi, par notre travail, nous avons été les instigateurs de quelque chose qui finira bien par répondre concrètement à un enjeu de santé majeur.

**François Gaie-Levrel :** Par ailleurs, très concrètement, nous venons de développer un banc d'essai similaire dans le cadre d'un besoin industriel pour la caractérisation de nanoparticules au sein d'une suspension colloïdale. C'est l'essence même d'un travail de recherche appliquée : transférer les compétences développées vers un besoin concret que l'on ne connaît pas toujours à l'avance ! ■

## RADON ET THORON : DES RÉFÉRENCES POUR LES FAIBLES ACTIVITÉS

**Le LNE-LNHB et ses partenaires ont mis au point de nouveaux étalons de radon et de thoron permettant de couvrir la totalité de la gamme des appareils commerciaux.**

Le radon et le thoron, deux isotopes gazeux descendants respectivement de l'uranium-238 et du thorium-232 présents dans la croûte terrestre, sont les deux sources principales de radioactivité naturelle. Leur présence au-dessus des seuils recommandés par l'OMS dans les habitations où les lieux de travail nécessitent un suivi spécifique. Dans ce but, quinze partenaires, dont le LNE-LNHB, issus de douze pays européens, ont mené à bien le projet MetroRADON. Entre 2017 et 2020, il visait à augmenter la traçabilité des mesures de faible activité typiques de l'environnement.

Plus particulièrement, les métrologues français se sont attelés à développer des étalons présentant une activité comprise entre 100 Bq/m<sup>3</sup> et 300 Bq/m<sup>3</sup> qui jusqu'alors faisaient défaut. Ces faibles niveaux d'activité sont en effet incompatibles avec la mise en œuvre d'étalons gazeux étant donnée la faible durée de vie des éléments considérés. Concrètement, ils verraient leur activité baisser trop rapidement pour être en pratique utilisables. Ainsi, les chercheurs du LNE-LNHB ont développé un nouveau type d'étalons dits par émanation. Ils prennent la forme d'un tube contenant une poudre de radium-226, (ou de thorium-228), enserrée entre deux membranes et calibrée pour émettre en continu du radon (ou du thoron), avec l'activité souhaitée. Plus précisément, leur activité décroît au cours du temps, mais suffisamment lentement pour que ces références puissent être mises en œuvre dans les laboratoires en charge de l'étalonnage des appareils de mesure utilisés en routine.

Comme l'explique Sylvie Pierre, du LNE-LNHB, «le développement de ces nouveaux étalons a nécessité un important travail

de synthèse chimique pour obtenir un dépôt solide à partir d'éléments liquides.» A la suite de quoi les métrologues ont amélioré le dispositif développé depuis 2015 dans leur laboratoire pour déterminer l'activité volumique de l'étalon selon des mesures tracées au Système international d'unités.

En parallèle, les physiciens ont mis au point un dispositif expérimental pour caractériser des membranes sélectives, imperméables au thoron mais laissant filtrer le radon. De fait, de nombreux appareils du commerce pour les mesures du radon sont sensibles également à l'activité du thoron, voyant leurs résultats de mesure biaisés et dépendants de la température. Cette étude a également permis de valider le modèle physique de diffusion du radon dans une membrane en fonction de la température, à partir duquel on peut déterminer les facteurs correctifs à appliquer en fonction de la température pour tout dispositif possédant une membrane sélective.

Enfin, avec huit partenaires au sein du projet, le LNE-LNHB a organisé à une inter-comparaison afin de vérifier la compatibilité des mesures réalisées dans les différents laboratoires nationaux de métrologie européens. Pour ce faire, les spécialistes français ont préparé un étalon gazeux de radon de grand volume qu'ils ont ensuite divisé en huit parties égales dont ils ont vérifié par spectrométrie gamma – une technique non destructive – qu'elles présentaient bien toutes strictement la même activité initiale. Résultat final : cohérence de l'ensemble des mesures dans la limite des incertitudes relatives comprises entre 1 % et 4 % selon les laboratoires. De quoi assurer la traçabilité des mesures de radon et de thoron à faible activité à l'échelle européenne. ■



BOUCLE PERMETTANT DE MESURER LES ÉMANATIONS DE RADON ET DE THORON.



## EMBALLAGES ALIMENTAIRES : LES CHALLENGES DE DEMAIN

D'ici à 2040, les plastiques à usage unique seront interdits en France. Participant activement au développement de solutions de substitution, de recyclage ou de réemploi des matériaux, le LNE mène actuellement plusieurs projets autour de la sécurité des matériaux d'emballage au contact des aliments. Par ailleurs, d'après l'article 61 de la loi AGECE seuls les emballages recyclables pourront être mis en marché à partir de 2030. Il apparaît crucial de développer des solutions qui soient recyclables pour assurer l'économie circulaire sans faire de compromis sur l'alimentarité.

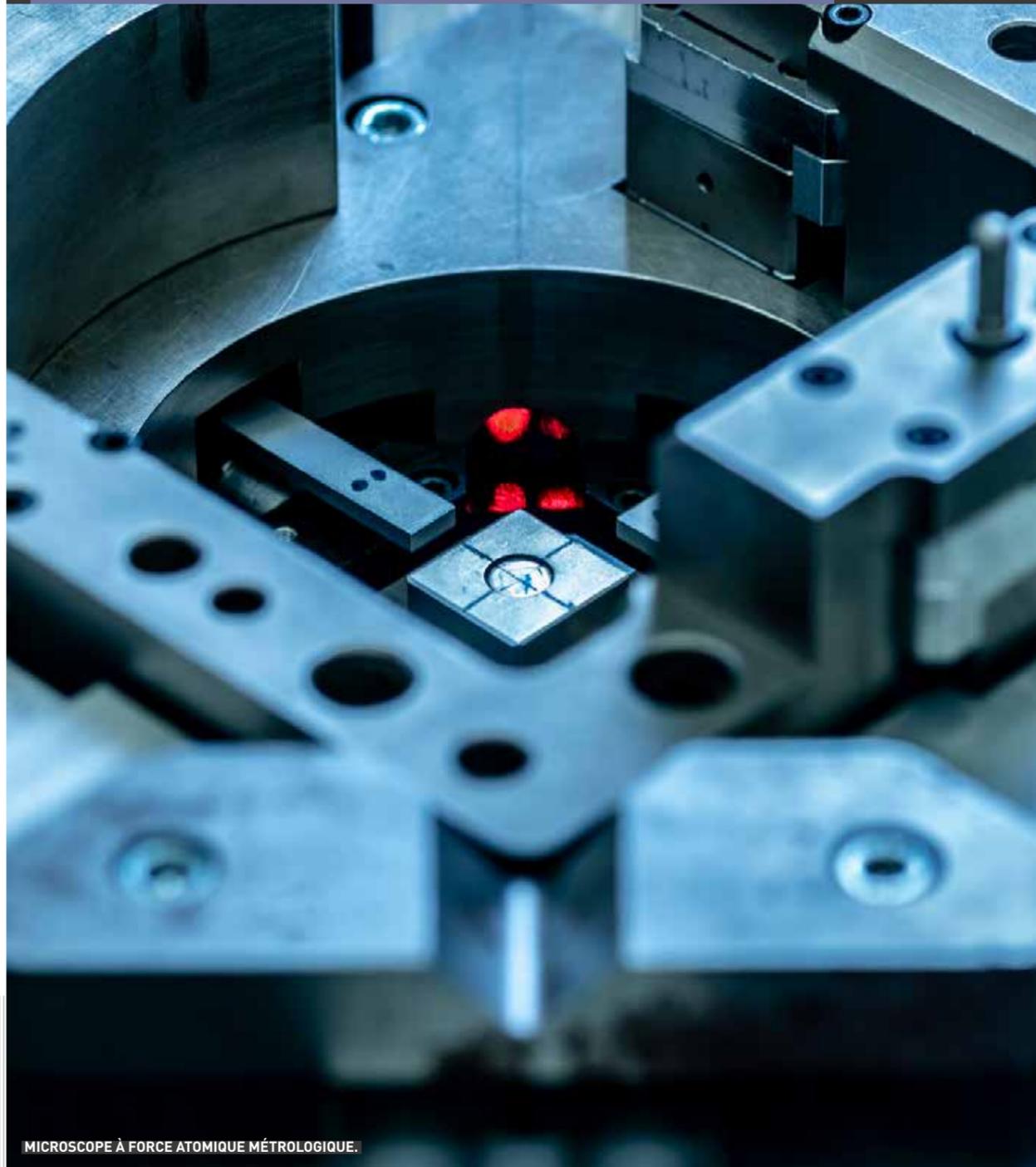
Ainsi, depuis fin 2020, le projet «Barquettes ABA», amorcé par Citeo en partenariat avec le laboratoire, vise à étudier l'intégration de PET (polyéthylène téréphtalate) recyclé issu de différents gisements derrière une barrière fonctionnelle pour les emballages alimentaires. Le projet repose sur un consortium regroupant le CTCPA, IPC INRAE et le LNE, dans lequel les scientifiques développent des modèles de cinétiques de migration, ainsi que des expérimentations avec des matériaux modèles.

Par ailleurs, en collaboration avec quatre autres équipes, dont le coordinateur CNRS, le LNE participe depuis cette année au projet PoLySafe financé par l'ANR sur les effets biologiques des molécules migrant à partir des matériaux de substitution au plastique. Les chimistes auront pour tâche de préparer des extraits à partir d'échantillons utilisés en restauration collective, et d'identifier les molécules présentes dans les contenus. Leur impact sur le métabolisme, et les voies hormonales sera ensuite évalué par des équipes de toxicologie et biologie.

Enfin, le projet de l'ANR, FoodSafeBioPack coordonné par l'INRAE, qui vient de débiter, a deux objectifs : d'une part développer des modélisations multiéchelles du relargage dans les aliments de substances issues d'emballages celluloseux (papier/carton) imprimés, d'autre part étudier à l'échelle du nanomètre les mécanismes de transfert et la structure des fibres et des aliments. Une approche préventive et universelle du risque de contamination sera également proposée pour des matériaux, dits barrières, développés par le CNRS et le CTP. ■

Ces différents projets sont réalisés au sein de l'unité mixte technologique (UMT 17.09) SafeMat (Sécurité des matériaux et emballages au contact) du réseau ACTIA, associant depuis 2017 les équipes du LNE et de l'INRAE/AgroParisTech (UMR 0782 SayFood Paris-Saclay Food and Bioproduct Engineering Research Unit). ■





MICROSCOPE À FORCE ATOMIQUE MÉTROLOGIQUE.

## INDUSTRIE : ACCOMPAGNER L'INNOVATION

Des nouveaux matériaux à l'intelligence artificielle en passant par l'univers des nanotechnologies, l'éclairage ou les réseaux d'énergie, le LNE et la métrologie française accompagnent les industriels dans la caractérisation, l'évaluation et la normalisation de leurs innovations.

## GRAPHÈNE : UNE MÉTROLOGIE DÉDIÉE POUR ACCÉLÉRER LES APPLICATIONS

Le graphène possède des propriétés physiques et chimiques exceptionnelles. Néanmoins, l'absence de méthodes robustes pour sa caractérisation freine l'émergence d'applications pourtant escomptées dans de nombreux domaines. Pour y remédier, le projet Graal du LNE, débuté en 2019 pour quatre ans, a pour objectif de mettre au point des protocoles de mesures, fiables et traçables au SI, des propriétés physico-chimiques de matériaux à base de graphène.

S'agissant de traiter différentes propriétés : structurales, thermiques, électriques ou chimiques, dont certaines sont «extrêmes» à l'image de l'épaisseur monoatomique du feuillet de carbone, les spécialistes ont opté pour une métrologie hybride incluant différentes techniques de microscopie, de spectroscopie, de radiométrie ou encore d'analyse de surface qu'ils peuvent combiner entre-elles. Certaines sont éprouvées sur le plan métrologique, telles que l'AFM ou la SEM pour lesquelles le LNE a développé une référence nationale. Mais

d'autres restent à perfectionner sur le plan métrologique. L'année passée, l'équipe de l'institut LNE-Nanotech a notamment collaboré avec le fabricant *Graphene XT* pour lequel il a caractérisé des films minces et des dispersions liquides de graphène. Par ailleurs, les métrologues français ont réalisé des mesures sur des masques FFP2 afin d'évaluer le risque de relargage de particules d'oxyde de graphène aux propriétés virucides. «L'idée est d'être capable de réaliser des caractérisations du graphène qu'il soit pur ou sous des formes plus complexes, et intégré dans différents matériaux ou des produits finis», précise Alexandra Delvallée, du LNE. Son collègue Félicien Schopfer ajoute : «Notre démarche allie la mise en place d'une métrologie avancée spécifique et des essais plus classiques visant à accompagner les industriels dans leurs besoins jusque sur des produits finis pour du contrôle qualité, de l'évaluation de performances ou de risques.» Le meilleur moyen de tirer parti des extraordinaires propriétés du graphène ! ■

### NANOFABRICATION DURABLE : BIENTÔT UN RÉSEAU EUROPÉEN DÉDIÉ

De la synthèse d'objets uniques à leur insertion dans des systèmes variés au sein des chaînes de valeurs : performances, risques, acceptabilité sociale, réglementation, cycle de vie... de nombreux enjeux sont associés à la nanofabrication.

Pour les traiter, le projet européen NanoFabNet, auquel participe le LNE, a débuté en 2020 pour au moins deux ans. Objectif à terme : mettre sur pied un Hub qui rassemble l'ensemble des acteurs concernés (industriels, entités gouvernementales, laboratoires, ONG...) à l'échelle du continent européen pour partager et hiérarchiser les besoins, et mettre en place différentes activités de service pour y répondre.

Comme l'explique Georges Favre, du LNE, «Cette première année a notamment mis en lumière de très gros besoins en matière de validation, d'harmonisation et de normalisation des méthodes de caractérisation et d'essais sur lesquels le LNE et les autres laboratoires nationaux de métrologie sont en première ligne.» Ils s'afficheront ainsi tels des acteurs incontournables d'un futur «guichet unique» réservé à la nanofabrication dans une perspective éthique et durable. ■



COUCHES DE GRAPHÈNE EXFOLIÉES OBSERVÉES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE.

## LES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DES MATÉRIAUX FAIBLEMENT CONDUCTEURS DÉSORMAIS ACCESSIBLES AUX PLUS PETITES ÉCHELLES

L'essor des nanotechnologies dépend de la mise en place d'une métrologie spécifique pour caractériser aux plus petites échelles spatiales les propriétés thermiques des matériaux. Dans ce but, le LNE a clos l'année dernière un projet de qualification métrologique de deux bancs de mesure.

La première installation de mesure, sans contact, consiste en un banc de radiométrie photothermique modulée. Elle permet de déterminer les propriétés thermiques (en particulier la conductivité thermique et la résistance thermique de contact) de couches minces à partir de l'étude de leurs réponses thermiques à des excitations photo-thermiques par un faisceau laser. Ainsi, en utilisant des échantillons massifs de référence, dont la réponse à la stimulation est donc connue, les métrologues ont amélioré leur installation de mesure. «*Nous avons ainsi pu la mettre à profit pour caractériser des propriétés thermiques de couches minces d'oxyde de graphène qui n'avait pas pu être déterminées*

*par d'autres techniques*», ajoute Nolwenn Fleurence, du LNE. Par ailleurs, les spécialistes du LNE ont poursuivi leurs travaux de caractérisation d'une deuxième installation de mesure, par contact cette fois. Il s'agit d'un microscope thermique à sonde locale (SThM), un des rares instruments capables de mesurer les propriétés thermiques des matériaux avec une résolution spatiale de quelques dizaines de nanomètres. Si la modélisation des transferts thermiques à l'échelle nanométrique demeure d'une très grande complexité, les chercheurs sont parvenus à étalonner leur installation. Ils ont en particulier montré que le SThM du LNE permet de caractériser des matériaux dont la conductivité thermique est inférieure à  $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  et ce avec une incertitude autour de 20 %. Le LNE est ainsi le premier laboratoire à avoir établi un bilan d'incertitude de mesure par cette technique, indispensable pour accompagner le développement industriel des nanotechnologies. ■



MICROSCOPE À FORCE ATOMIQUE À POINTE CONDUCTRICE.

### RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE : VERS DES TESTS HAUT DÉBIT POUR CARACTÉRISER LES NANOFILS

Les systèmes de récupération d'énergie constitués de nanofils semi-conducteurs sont très performants mais encore difficiles à tester et à caractériser. Dans ce but, le projet européen NanoWires, démarré en 2020 et auquel participe le LNE, vise à mettre en place une métrologie «haut débit» permettant de relier les propriétés individuelles des nanofils à celles du dispositif entier.

Dans ce cadre, le LNE mettra à profit plusieurs de ses installations métrologiques (AFM<sup>1</sup>, C-AFM<sup>2</sup>, SMM<sup>3</sup> et SThM<sup>4</sup>) afin de caractériser les propriétés mécaniques, électriques,

piézoélectriques et thermiques de différents échantillons de nanofils pris dans une matrice isolante. «*Afin d'optimiser les mesures de la caractéristique courant/tension des nanofils, nous prévoyons notamment d'instrumenter la pointe de notre AFM avec un capteur MEMS développé par plusieurs de nos partenaires*», complète François Piquemal, du LNE. ■

<sup>1</sup> AFM : microscope à force atomique.

<sup>2</sup> C-AFM : microscope à force atomique à pointe conductrice

<sup>3</sup> SMM : microscope à sonde locale électrique micro-onde

<sup>4</sup> SThM : microscope thermique à sonde locale

## ÉCLAIRAGE ROUTIER : LA SÉCURITÉ ET LA CONSOMMATION DANS LE VISEUR DE LA MÉTROLOGIE

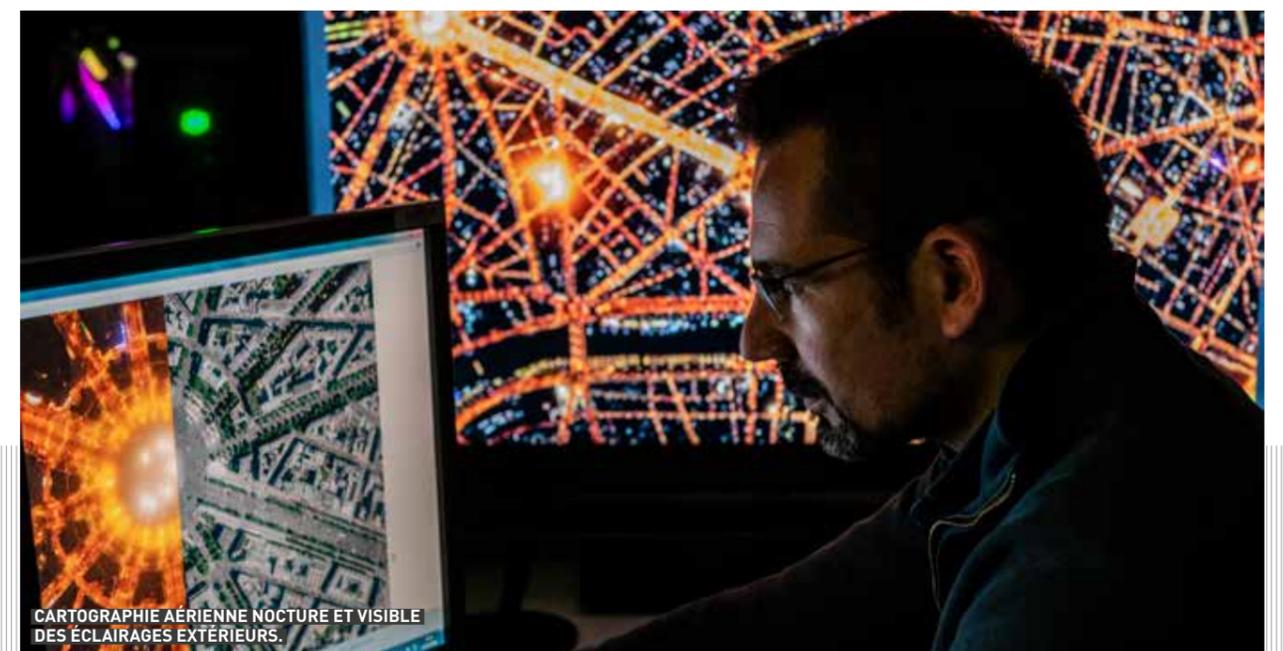
De forts enjeux de sécurité et de consommation énergétique sont associés à l'éclairage routier. Pour les prendre en compte, il était nécessaire de refondre le cadre métrologique permettant la caractérisation photométrique des revêtements routiers, soit leur capacité à réfléchir la lumière à laquelle est associé le coefficient de luminance de surface. C'était l'objectif du projet européen SURFACE, terminé l'année dernière et auquel le LNE a participé.

Précisément, le laboratoire est intervenu comme support pour le calcul des incertitudes de mesure dans un domaine où celles-ci n'étaient jusqu'alors prises en compte que de manière très approximative. S'agissant d'une configuration de mesure complexe du point de vue géométrique et gourmande en temps d'exécution, les métrologues français ont ainsi développé à partir de zéro un modèle d'évaluation de la réflexion des chaussées permettant de prendre en compte les différents revêtements retenus pour l'étude. «*Afin d'optimiser les calculs, nous avons utilisé ce modèle pour définir des tables d'interpolation et adapter des techniques de Monte-Carlo et d'approximation, pour évaluer toutes les contributions d'incertitude.*», explique Dominique Renoux, du LNE.

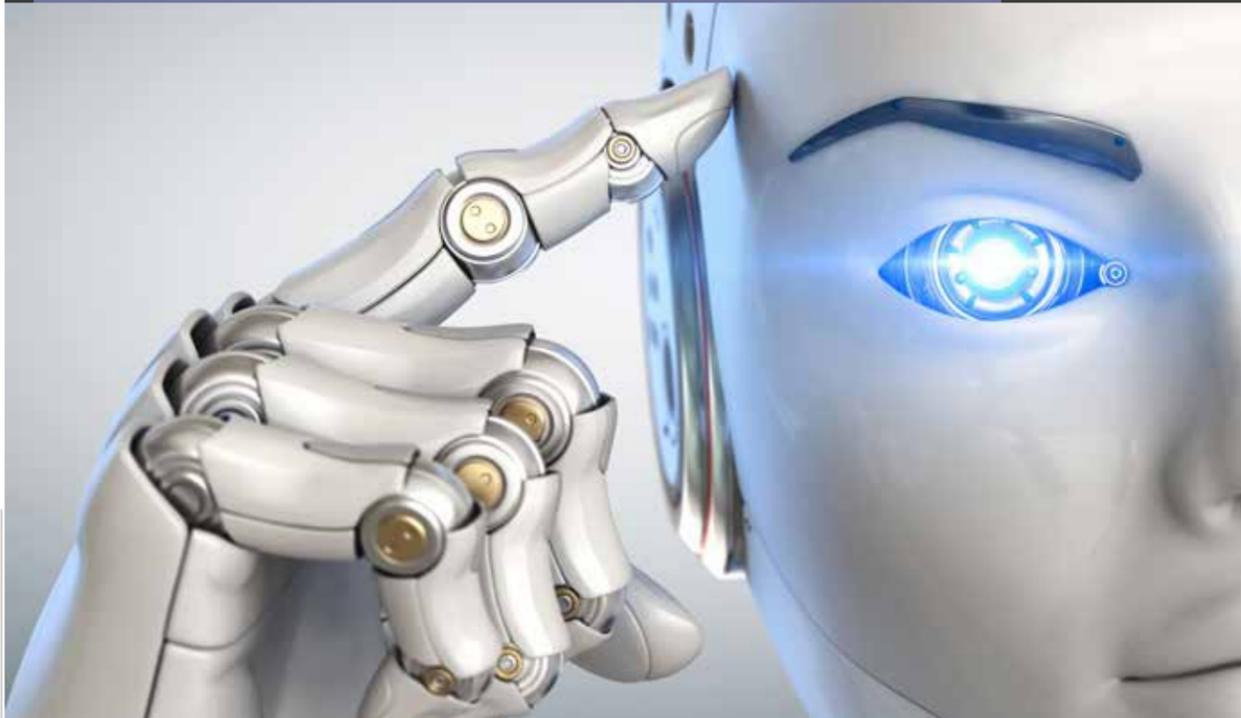
En parallèle, les scientifiques ont réalisé une étude visant à déterminer le potentiel de différentes sources d'éclairage utilisables comme référence pour les mesures de luminance de surface. Dans ce domaine de l'éclairage routier où le LNE n'était pas positionné, le projet SURFACE lui a ouvert la perspective de nouveaux partenariats en même temps qu'il a créé des synergies avec d'autres aspects des mesures d'éclairage où l'expertise du laboratoire est déjà bien reconnue. ■

### L'ÉCLAIRAGE NOCTURNE DANS L'ŒIL DES MÉTROLOGUES

Les nuisances lumineuses ont un impact environnemental et sanitaire, et font l'objet d'une réglementation de plus en plus complète. D'où un besoin accru, notamment pour des collectivités territoriales, d'outils métrologiques pour caractériser l'éclairage extérieur. Dans ce contexte, le LNE vient de démarrer un projet de photométrie par prise de vue aérienne. Son objectif : le développement d'une caméra permettant de mesurer, de manière traçable au SI, la luminance verticale et les composantes colorimétriques de la lumière émise vers le ciel par une zone au sol de  $500 \text{ km}^2$  avec une résolution spatiale inférieure à  $0,1 \text{ m}^2$ . «*En complément de mesures locales, il sera ainsi possible de mesurer de manière exhaustive la lumière en provenance de l'espace public ou privé, à l'échelle d'un territoire*», détaille Romain Chasseigne, au LNE. De quoi objectiver un phénomène à forts enjeux sociétaux, mais encore aujourd'hui mal connu. ■



CARTOGRAPHIE AÉRIENNE NOCTURNE ET VISIBLE DES ÉCLAIRAGES EXTÉRIEURS.



## INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, LE LNE DÉSORMAIS INCONTOURNABLE

**L'essor de l'IA nécessite la mise en place de méthodes d'évaluation dédiées. Ce à quoi s'emploie le laboratoire à travers différents projets.**

Comment caractériser, tester les performances ou mesurer l'acceptabilité d'une application intégrant de l'intelligence artificielle ? Alors que celle-ci est en plein essor, les spécialistes du LNE sont résolument engagés dans l'émergence de méthodes d'évaluation pour des systèmes d'IA telle que l'illustrent plusieurs projets en cours au laboratoire.

Ainsi, l'année dernière a vu le démarrage du projet européen AIR dont le LNE est partenaire. Il vise au développement d'un circuit intégré sur lequel sera directement implantée une IA, dite analogique, pour le traitement des données issues d'un système radar de courte et moyenne portées. «L'objectif est de pouvoir détecter la respiration et le rythme cardiaque de personnes à distance pour des applications médicales», complète Rémi Régnier, du LNE. La tâche des chercheurs consistera à caractériser les performances du dispositif avec l'ambition, à termes, de développer une méthode d'évaluation des IA analogiques aujourd'hui inexistante.

Le laboratoire est également engagé depuis cette année dans le projet européen MISEL. Objectif : mettre au point une «rétine intelligente» de très faible consommation pour des applications notamment en robotique. Précisément, celle-ci sera composée de quatre couches : une pour la détection, la deuxième pour traiter la mémoire à court terme et les deux dernières pour l'analyse des images. «L'idée est de mimer le fonctionnement du cortex visuel», explique Olivier Galibert, du LNE. Les chercheurs du laboratoire se concentreront sur le développement des métriques pour évaluer les performances de la couche de détection et des deux couches de calcul. Ces performances

pourront ainsi être comparées à celles de systèmes plus performants mais aussi beaucoup moins souples d'utilisation.

Depuis quelques mois, le LNE est aussi partenaire du projet européen ROBOTICS4EU visant au développement d'outils pour estimer l'acceptabilité des robots par la société. «Sur la base d'une cartographie européenne des «bonnes pratiques» liées au développement de la robotique, ainsi que d'une enquête auprès des acteurs du domaine pour inventorier leurs besoins, les spécialistes ont pour objectif de développer un modèle permettant d'estimer de manière objective l'acceptabilité des robots selon différents aspects», explique Agnès Delaborde, du LNE. Un enjeu qui concerne aussi bien les fabricants, les décideurs politiques que les utilisateurs finaux.

Enfin, cette année voit la mise en place d'une chaire impliquant différents laboratoires et industriels pour le développement d'une plateforme d'évaluation de l'intelligence artificielle. «Il s'agira de développer des métriques d'évaluation des performances des IA, mais également des outils pour comprendre la logique de prise de décision d'algorithmes s'apparentant souvent à des «boîtes noires», domaine que l'on appelle l'explicabilité», développe Guillaume Bernard. Concrètement, le partenariat se nouera autour de différents programmes doctoraux et postdoctoraux, de stages pré-doctoraux ainsi que de rencontres et conférences. Par exemple, dès l'année 2021, une thèse en cotutelle entre le LNE et le Laboratoire informatique d'Avignon s'attaquera à l'explicabilité des systèmes de transcription automatique de la parole. Dans ce domaine comme dans tous ceux où l'IA s'affiche comme incontournable, le LNE entend devenir un organisme de référence. ■

## LE RAIL EUROPÉEN UNIFIÉ PAR LA MÉTROLOGIE

Un réseau ferré interopérable à l'échelle de l'Europe ? Pour atteindre cet objectif, il faut pouvoir garantir des mesures traçables de la puissance électrique consommée par une motrice d'un bout à l'autre du continent. C'était l'enjeu du projet européen MyRailS, terminé il y a quelques mois, qui a réuni seize partenaires de sept pays. Concrètement pour le LNE, il s'agissait de développer un système de référence permettant d'étalonner les appareils de mesure d'énergie à bord des trains.

Pour ce faire, les chercheurs ont dû relever le défi de générer en laboratoire des puissances suffisamment élevées pour être dans les conditions réelles de fonctionnement, et de prendre en compte les conditions électriques ferroviaires qui sont par nature perturbées. Le résultat se présente sous la forme d'un banc d'étalonnage novateur composé d'une source de puissance capable de délivrer un courant alternatif d'une intensité de 500 A avec des harmoniques allant jusqu'à 5 kHz au potentiel de 25 kV.

Afin de reproduire ces perturbations à hautes fréquences, le système d'amplification à large bande passante intègre des matériaux magnétiques compacts avec des noyaux nanocristallins. Par ailleurs, afin d'étalonner simultanément en tension et en courant, sans engendrer des puissances incompatibles avec un banc transportable, les chercheurs ont proposé une source dite fictive scindée en deux parties. «La première génère le courant de forte intensité sous faible tension avec un taux de distorsion représentatif de ce qui est observé sur site et la seconde est reliée à la terre de telle manière qu'aucun courant n'y circule malgré un potentiel électrique très élevé», explique Daniela Istrate, responsable



**GÉNÉRATION SYNCHRONE D'UN COURANT DÉFORMÉ ET D'UNE PRESSION SINUSOÏDALE POUR ÉTALONNER UN SYSTÈME DE MESURE D'ÉNERGIE.**

du projet au LNE. Un logiciel assure également la correction d'éventuelles déformations de l'onde de courant introduites par le dispositif d'injection afin de garantir la conservation du taux de distorsion harmonique souhaité.

Résultat : au moyen de ce banc, il est désormais possible d'étalonner des appareils de mesure d'énergie électrique selon les normes ferroviaires en vigueur et avec une incertitude relative de 0,1 % sur la puissance active. À l'avenir, les différents partenaires du projet envisagent même de proposer des recommandations permettant d'aller au-delà de ces normes. ■

## ÉLECTRONIQUE MOBILE : UNE MÉTROLOGIE POUR RELEVER LE DÉFI DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

L'émergence de la 5G et de l'internet des objets s'accompagne d'une forte augmentation de la consommation énergétique associée au secteur de l'information et de la communication, dont 20 % est attribuable aux appareils personnels mobiles. Dans ce cadre, le projet européen ADVENT, coordonné par le LNE et terminé en 2020, visait au développement d'une métrologie multi-échelle (du matériau au système) permettant d'évaluer, in situ et en fonctionnement, les caractéristiques énergétiques des composants de ces appareils.

À l'échelle des matériaux, les métrologues du LNE ont ainsi développé des étalons nanométriques pour assurer la traçabilité des mesures de capacité par SMM (Scanning Microwave Microscope) de nanomatériaux avancés, tels que les matériaux piézoélectriques. Comme l'indique François Ziadé, du LNE, «partis d'une situation où il n'y avait rien, nous avons désormais la possibilité de mesurer des capacités dans une

gamme allant de l'attofarad à plusieurs femtofarad avec une incertitude de l'ordre de 10 %.»

En outre, les spécialistes français ont mis au point un capteur de puissance pour des composants dont la fréquence de fonctionnement est autour de 42 GHz, l'une des fréquences retenues pour la 5G. Développé sur puce électronique, ce capteur offre l'opportunité de contourner des contraintes de connexion affectant les mesures et permettra l'étalonnage de capteurs industriels intégrés. Résultat : la possibilité de réaliser des mesures avec une incertitude de quelques dizaines de microwatts dans un domaine où là aussi les métrologues portaient d'une feuille blanche. Ce développement permettra d'accompagner les industriels dans une meilleure définition des capteurs de puissance, incontournable dans l'électronique mobile d'aujourd'hui et de demain. ■

## TRÈS BASSES PRESSIONS : LA SENSIBILITÉ DES JAUGES À IONISATION À LA HAUSSE

Pour mesurer de très faibles pressions (ultravide), fréquemment utilisées dans la recherche en physique fondamentale ou dans l'industrie des semi-conducteurs, on utilise des jauges à ionisation. Elles consistent en un faisceau d'électrons qui ionise le gaz, avant que les ions qui en résultent soient «collectés». Le courant électrique associé est alors proportionnel à la densité du gaz, donc à sa pression.

Mais comme l'explique Frédéric Boineau, du LNE, «*en pratique, la maîtrise de la sensibilité de ces instruments, essentiellement le rapport entre la pression du gaz et le courant collecté, est peu satisfaisante. La sensibilité dépend de la géométrie de la jauge utilisée, de la pression à mesurer et du gaz considéré, et manque en outre de stabilité dans le temps.*» Pour y remédier, le LNE a participé jusqu'à l'année dernière au projet européen Ion Gauge aux côtés de plusieurs autres laboratoires de métrologie et partenaires industriels.

Dans un premier temps, le LNE a contribué à un important travail bibliographique permettant de dresser un état de l'art de la situation. Celui-ci a servi de point d'appui à des simulations numériques permettant d'optimiser la géométrie d'une jauge afin que sa sensibilité soit robuste.

Le LNE a ensuite participé à la caractérisation de plusieurs prototypes de jauges à ionisation réalisées selon les nouvelles prescriptions, de même qu'à une comparaison entre quatre laboratoires nationaux de métrologie. Résultat : une sensibilité maîtrisée à 1 %, légèrement au-delà des espérances. De quoi assurer à terme une précision inégalée des mesures de pression dans la gamme comprise entre  $10^{-6}$  Pa et  $10^{-2}$  Pa. ■

*\* Le projet 16NRM05 Ion Gauge a reçu un financement du programme EMPIR, cofinancé par les États participants, et du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne.*



JAUGE À IONISATION CONÇUE DANS LE CADRE  
DU PROJET EUROPÉEN ION GAUGE\*.

## L'INCERTITUDE PRISE EN COMPTE DANS LES PROCESSUS INDUSTRIELS

Dans l'usine «4.0», des chaînes de production complexes sont assurées par des systèmes automatiques qui prennent des décisions sur la base de centaines, voire de milliers d'informations remontées par des capteurs. Mais jusqu'à aujourd'hui, il manquait la possibilité de prendre en compte, non seulement les valeurs des paramètres mesurés, mais également l'incertitude qui leur est associée. C'est désormais possible grâce au programme européen MET4FoF, en cours de finalisation, auquel a participé le LNE.

Dans ce cadre, les chercheurs du LNE ont eu pour tâche de développer des algorithmes permettant de fusionner des données mesurées avec des incertitudes variées. Plus précisément, «en

*utilisant les techniques issues de l'apprentissage statistique (machine learning), nous avons développé des algorithmes capables, à partir de centaines d'informations hétérogènes, de sélectionner le juste jeu de variables permettant d'assurer un bon niveau de prédiction de l'intégrité ou des performances d'un processus*», explique Loïc Coquelin, du LNE.

Plus globalement, les algorithmes du LNE s'insèrent dans une infrastructure complète, allant de la mise au point de capteurs capables d'estimer in situ une incertitude de mesure, à celui d'un système multi-agent pour la gestion d'un processus industriel de bout en bout. Actuellement en cours de mise en œuvre auprès de deux industriels partenaires, elle préfigure l'usine de demain ! ■



NOUVELLE SPHÈRE D'ÉTALONNAGE POUR LE VIDE SECONDAIRE. ELLE REMPLACE LA SPHÈRE DE RÉFÉRENCE, AU SECOND PLAN, APRÈS PLUS DE 50 ANS DE SERVICE À LA SOGEV (SOCIÉTÉ GÉNÉRALE DU VIDE) PUIS AU LNE À PARTIR DU MILIEU DES ANNÉES 80.



## MÉTROLOGIE FONDAMENTALE ET DISSÉMINATION DU SI

L'amélioration de l'exactitude des étalons fondamentaux demeurent au cœur de l'activité du LNE et des laboratoires du Réseau national de la métrologie française. Cela comprend aussi bien des recherches de physique fondamentale que des développements pour la dissémination des unités vers les utilisateurs finaux ou l'adaptation des références nationales à de nouvelles applications.

## DONNÉES ATOMIQUES ET NUCLÉAIRES : LEUR MESURE ET LEUR ÉVALUATION ASSURÉES DANS LA DURÉE

Les travaux du LNE-LNHB participent aux efforts internationaux d'amélioration des données atomiques et nucléaires. Le laboratoire joue également un rôle central de coordination et d'édition pour leur synthèse et leur mise à disposition des utilisateurs.

La métrologie de la radioactivité doit faire face à un défi unique pour établir l'unité becquerel. En effet, chaque radionucléide possède sa propre identité avec des modes de désintégration, des types de particules, des énergies et des intensités d'émission bien spécifiques. Pour déterminer la manière dont décroît au cours du temps une certaine quantité d'un radionucléide, il est nécessaire de connaître avec un maximum de précision la totalité de ses voies de désintégration, en particulier les spectres en énergie des particules émises. Une connaissance métrologique fine de la décroissance des radionucléides est donc essentielle en métrologie, mais revêt également une importance capitale en médecine, en physique fondamentale, pour la production d'électricité ou pour des applications de défense nationale. La mesure et l'évaluation de ces données atomiques et nucléaires est assurée en France par le LNE-LNHB, laboratoire incontournable dans le paysage mondial de la métrologie de la radioactivité.

Afin d'assurer aux utilisateurs la meilleure information possible en la matière, le LNE-LNHB coordonne le *Decay Data Evaluation Project* (DDEP). Ce projet international informel a débuté en 1995 et a pour objectif l'évaluation et la synthèse de l'ensemble des données nucléaires mondiales pour les radionucléides d'intérêt métrologique. La valeur recommandée et son incertitude de détermination sont établies avec soin pour chaque grandeur d'intérêt par le groupe du DDEP. Ces valeurs sont consultables par différentes publications dont celles du BIPM. Depuis plus de vingt ans, le LNE-LNHB développe une base de données conséquente ainsi qu'un ensemble d'outils pour la rendre accessible depuis son site internet (<http://www.lnhb.fr/donnees-nucleaires/>). Grâce à un dialogue permanent, cette activité de dissémination s'efforce de répondre au mieux aux besoins des différents utilisateurs, année après année.

Une partie de ces efforts sont menés au sein de différents projets, et 2020 a vu l'aboutissement de certains d'entre eux. Ainsi, les physiciens du LNE-LNHB ont développé le module Nuclide++ pour le code de simulation Monte-Carlo GEANT4. Il permet de manière simple d'utiliser l'ensemble des données du DDEP dans ce code de référence des simulations des interactions rayonnements-matière, que ce soit pour étudier la réponse d'un détecteur face à une source ou celle d'un tissu biologique à un traitement de radiothérapie interne ou externe. En parallèle, Abhilasha Singh a soutenu sa thèse de doctorat sur l'étude métrologique de la forme des spectres bêta de différents radionucléides, par la mise en œuvre d'un spectromètre bas bruit à très haute couverture angulaire. Ses résultats ont été comparés à ceux obtenus par d'autres méthodes et avec les prédictions théoriques faites à partir du code BetaShape, développé au laboratoire par Xavier Mougeot et dont une nouvelle version est disponible depuis quelques mois. Ce chercheur a par ailleurs soutenu son Habilitation à Diriger des Recherches sur ce thème en 2020.

Les évaluations de données atomiques et nucléaires, ainsi qu'une partie des mesures, conduites au LNE-LNHB sont financées par les crédits de l'Etat alloués à la Métrologie française. Au regard de l'importance de ces études, décision a été prise d'en assurer la pérennité en les inscrivant dans le programme d'activités permanentes du laboratoire, à partir de cette année. Comme l'indique Mark Kellett, chef du Laboratoire de Métrologie de l'Activité au sein du LNE-LNHB : « Cette visibilité est essentielle pour assurer nos travaux dans le cadre du DDEP, travaux indispensables à de nombreuses communautés mais rarement sous le feu des projecteurs. Grâce à notre activité de dissémination, ces fonds permettent également de mettre en avant l'ensemble de nos activités et, ce faisant, d'élaborer de nouveaux projets avec nos partenaires, tout en visant à maintenir au meilleur niveau mondial l'expertise du LNE-LNHB en métrologie de la radioactivité. ■

## ÉTALON DE PRESSION : LE PASCAL EST DÉSORMAIS QUANTIQUE

Aujourd'hui, les étalons primaires de pression sont fondés sur des instruments dont les performances métrologiques n'ont pas évolué de manière significative depuis plusieurs décennies. Afin de changer cette situation, le LNE-LCM/Cnam développe un étalon quantique original pour la mesure absolue de pression dans la gamme comprise entre 200 Pa et 20 000 Pa. Ce développement fait d'ailleurs l'objet de la thèse de doctorat de Pascal Gambette.

Son principe : une cavité micro-onde supraconductrice dans laquelle de l'hélium gazeux est maintenu à très basse température. En mesurant les fréquences de résonance de ce système et la température du gaz, on en déduit son indice de réfraction qui, à l'aide de calculs numériques sur la base d'équations fondamentales de la mécanique quantique, permet de déterminer la pression du gaz.

Au-delà de son principe, la réalisation de cet étalon est le fruit d'un savoir-faire des chercheurs du LNE-LCM/Cnam dans plusieurs domaines. La maîtrise des basses températures (la

température de l'hélium est ici maintenue autour de 5 K), de la supraconduction qui permet d'augmenter le coefficient d'efficacité de la cavité d'un facteur 40, d'où une très bonne résolution sur la mesure des fréquences de résonance, la mesure de température thermodynamique et des calculs de données quantiques.

Le dispositif, développé par l'équipe de physiciens, est encore en cours de caractérisation métrologique mais les travaux se poursuivent dans le cadre d'un projet européen, QuantumPascal, qui se terminera l'année prochaine et auquel le LNE participe aux côtés de 11 partenaires. Et, comme l'indique Laurent Pitre, chercheur et initiateur de ces travaux au LNE-LCM, «à termes, il permettra de mesurer des pressions avec une incertitude relative de quelques dizaines de parties par million, soit une amélioration d'un facteur 5 par rapport à l'existant, avec par ailleurs des marges de progression importantes en termes de coût ou de stabilité.» ■

## GRAVIMÉTRIE : LE POIDS DU LNE-SYRTE RENFORCÉ



LABORATOIRE DE GRAVIMÉTRIE AU LNE-TRAPPES LORS D'UNE COMPARAISON DE GRAVIMÈTRES ATOMIQUES IMPLIQUANT LE CAG ET DEUX GRAVIMÈTRES MUQUANS.

Une connaissance précise de  $g$ , l'accélération de la pesanteur, et de ses fluctuations spatio-temporelles, revêt une importance capitale en métrologie et en physique fondamentale notamment pour la réalisation de l'unité kilogramme, mais aussi en géodésie, géophysique ou encore océanographie. Depuis plusieurs années, les métrologues du LNE-SYRTE raffinent leurs installations dédiées à sa détermination, et sont

désormais incontournables tant sur le plan fondamental que celui des applications.

Le gravimètre atomique (CAG) qu'ils ont développé, référence nationale depuis 10 ans, détient désormais le record mondial d'exactitude, atteignant une incertitude relative de  $2 \times 10^{-9}$  et une sensibilité à long terme de  $5 \times 10^{-11} g$ . Par ailleurs, le site du LNE-SYRTE fait désormais partie du SNO gravimétrie (Service National d'Observation) de l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS, contribuant au suivi en continu de l'accélération de la pesanteur. «Celui-ci est assuré par un gravimètre supraconducteur relatif qui assure la stabilité à long terme, l'exactitude étant garantie par le CAG», précise Sébastien Merlet, du LNE-SYRTE.

En parallèle de ses activités fondamentales, le laboratoire accueille les gravimètres d'institutions nationales pour des comparaisons. Il apporte en particulier son soutien à l'évaluation métrologique des performances de leurs gravimètres quantiques, fabriqués par la société Muquans. Leur particularité : leur fonctionnement repose sur les technologies quantiques développées au LNE-SYRTE puis transférées à la start-up. Parmi leurs potentialités, ces nouvelles générations d'instruments devraient compléter les capacités existantes de surveillance à long terme du champ de gravité terrestre. ■

## LA SECONDE OPTIQUE BIENTÔT AU-DELÀ DES LIMITES QUANTIQUES

Poursuivant ses travaux sur les horloges atomiques dites optiques, le LNE-SYRTE se rapproche des limites ultimes en matière de précision sur les mesures de temps.

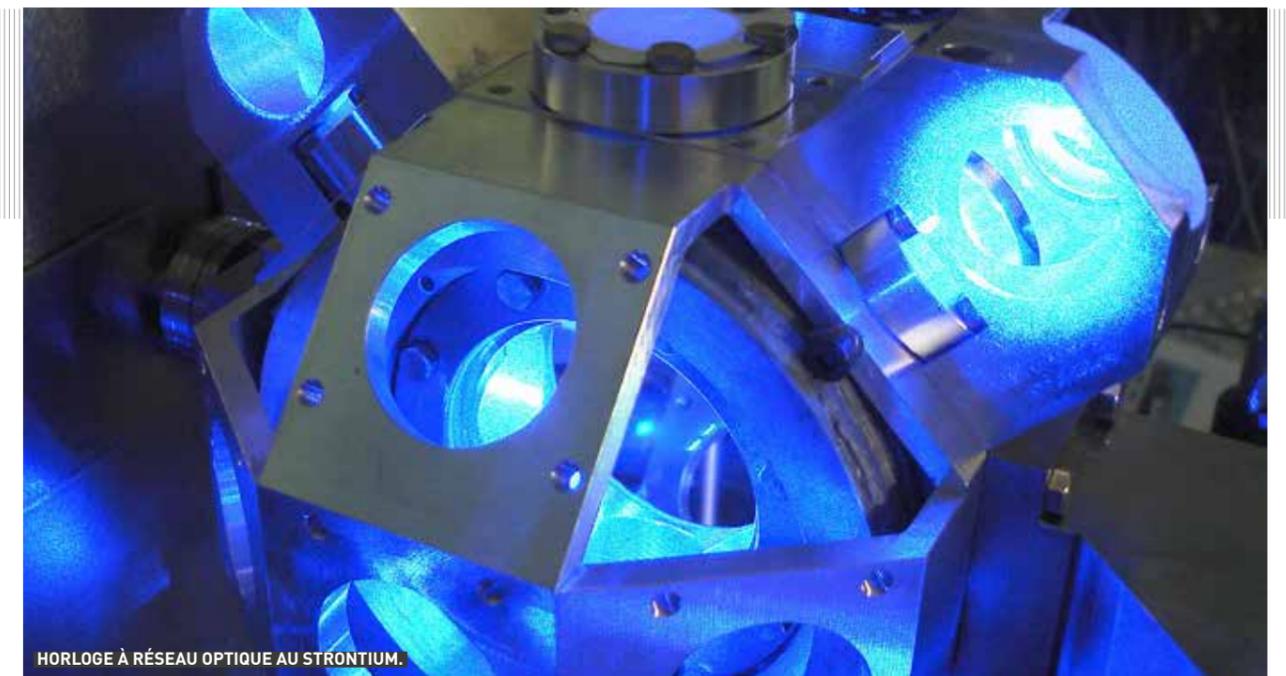
Définie à partir de la fréquence de transition entre deux niveaux d'énergie de l'atome de césium, située dans le domaine micro-onde, la seconde est aujourd'hui déterminée avec une incertitude relative de l'ordre de  $10^{-16}$ . C'est ainsi qu'aujourd'hui la seconde est l'unité du SI réalisée avec la plus grande précision. Pour autant, les progrès réalisés ces dernières années dans le domaine des horloges atomiques laissent entrevoir la possibilité d'une nouvelle définition de l'unité de temps au moins 10 fois plus précise. Comment ? En utilisant des transitions atomiques à des fréquences plus élevées, située dans la partie dite optique du spectre électromagnétique. Une possibilité pour les mettre en œuvre repose sur l'utilisation d'horloges au strontium, dont le LNE-SYRTE a développé depuis plusieurs années deux exemplaires au plus haut niveau mondial. Mais pour que celles-ci deviennent le nouvel étalon de référence, reste encore aux spécialistes à en maîtriser toutes les subtilités.

Dans ce but, les métrologues français ont notamment poursuivi, l'année passée, leurs travaux visant à un meilleur contrôle de l'effet des collisions entre les atomes de strontium et le gaz résiduel présent dans l'enclume à vide qui les contient. Afin de déterminer la nature chimique de ce gaz, dont dépend la manière dont les collisions affectent la fréquence de transition de leurs horloges, ils ont ainsi développé un modèle et l'ont confronté à de nouvelles mesures avec des gaz comme l'azote ou l'argon. Par ailleurs, les chercheurs du LNE-SYRTE ont poursuivi leur participation aux comparaisons des horloges optiques des différents laboratoires européens de métrologie du temps.

Cet exercice est en effet indispensable pour assurer leur robustesse dans la durée.

Enfin, les physiciens se sont attelés à la prise en compte des limites dites fondamentales qui affectent la stabilité de leurs horloges. Plus précisément, les propriétés quantiques aléatoires des atomes font que la mesure de leur fréquence par un laser est entachée d'une incertitude intrinsèque. Néanmoins, pour en abaisser la valeur, il est possible de tirer parti d'une autre propriété quantique qui permet de placer des atomes dans un état dit intriqué tel qu'ils ne forment plus une collection de particules isolées, mais une entité irréductible sans équivalent classique. «Les atomes de strontium "répondent" alors à l'unisson à la sollicitation du laser, la précision sur la mesure de leur fréquence augmente», explique Jérôme Lodewyck, du LNE-SYRTE.

Ainsi, en 2020, les spécialistes ont réalisé un système de mesure d'une grande sensibilité qui pourra produire ces états par le biais d'une interaction entre la lumière et les atomes qui ne détruit pas leurs propriétés quantiques, ce qui est un préalable à sa mise en œuvre pour augmenter les performances des horloges optiques. «De cette manière, on peut envisager de réduire le temps de mesure nécessaire pour «interroger» une horloge quant à sa fréquence, et se rapprocher ainsi un peu plus de la possibilité de définir la seconde avec une incertitude autour de  $10^{-18}$  tel qu'il est envisagé en principe avec une horloge optique», indique le physicien. De quoi résolument mettre un peu plus encore la «seconde optique» à portée de main. ■



HORLOGE À RÉSEAU OPTIQUE AU STRONTIUM.

## DES TERRES RARES POUR AMÉLIORER LA STABILITÉ DES HORLOGES OPTIQUES

Les horloges atomiques dites optiques, fondées sur des transitions atomiques à plus hautes fréquences que leurs homologues micro-ondes qui définissent actuellement la seconde, représentent le futur de la métrologie du temps. Pour s'en rapprocher, les chercheurs du LNE-SYRTE ont mené entre 2017 et 2020 le projet LASTRAHO visant à un meilleur contrôle de la stabilité du laser en charge de sonder la fréquence des atomes de l'horloge.

Actuellement, l'agitation thermique de la cavité de référence des lasers utilisés pour ce faire limite en pratique la précision des horloges optiques. Afin de gagner un ordre de grandeur, une voie possible est d'utiliser un laser asservi sur terres-rares. L'idée ? Contrôler la fréquence du laser en le mettant en résonance avec des ions de terres rares enchâssés dans une matrice cristalline. En effet, par un procédé dit de trous

brûlés, il est possible de contraindre l'asservissement dans une bande de fréquences de quelques hertz ou moins.

Lors de leurs études, les physiciens ont en particulier étudié l'effet de différentes perturbations susceptibles d'altérer les fréquences de transition des ions de terres rares. Comme l'explique Yann Le Coq, du LNE-SYRTE, « nous avons ainsi montré que les vibrations mécaniques, de même que les champs électriques parasites ne seront pas limitant pour les performances de notre dispositif ».

En parallèle, les chercheurs ont démontré une stabilité laser de  $1,7 \times 10^{-15}$ , comparable à celle obtenue ultimement par les techniques actuelles et par ailleurs limitée à ce stade par les fluctuations de température du cryostat. Pour l'améliorer, un nouveau projet vient de débiter au LNE-SYRTE. De quoi tirer parti à termes de tout le potentiel des horloges optiques. ■

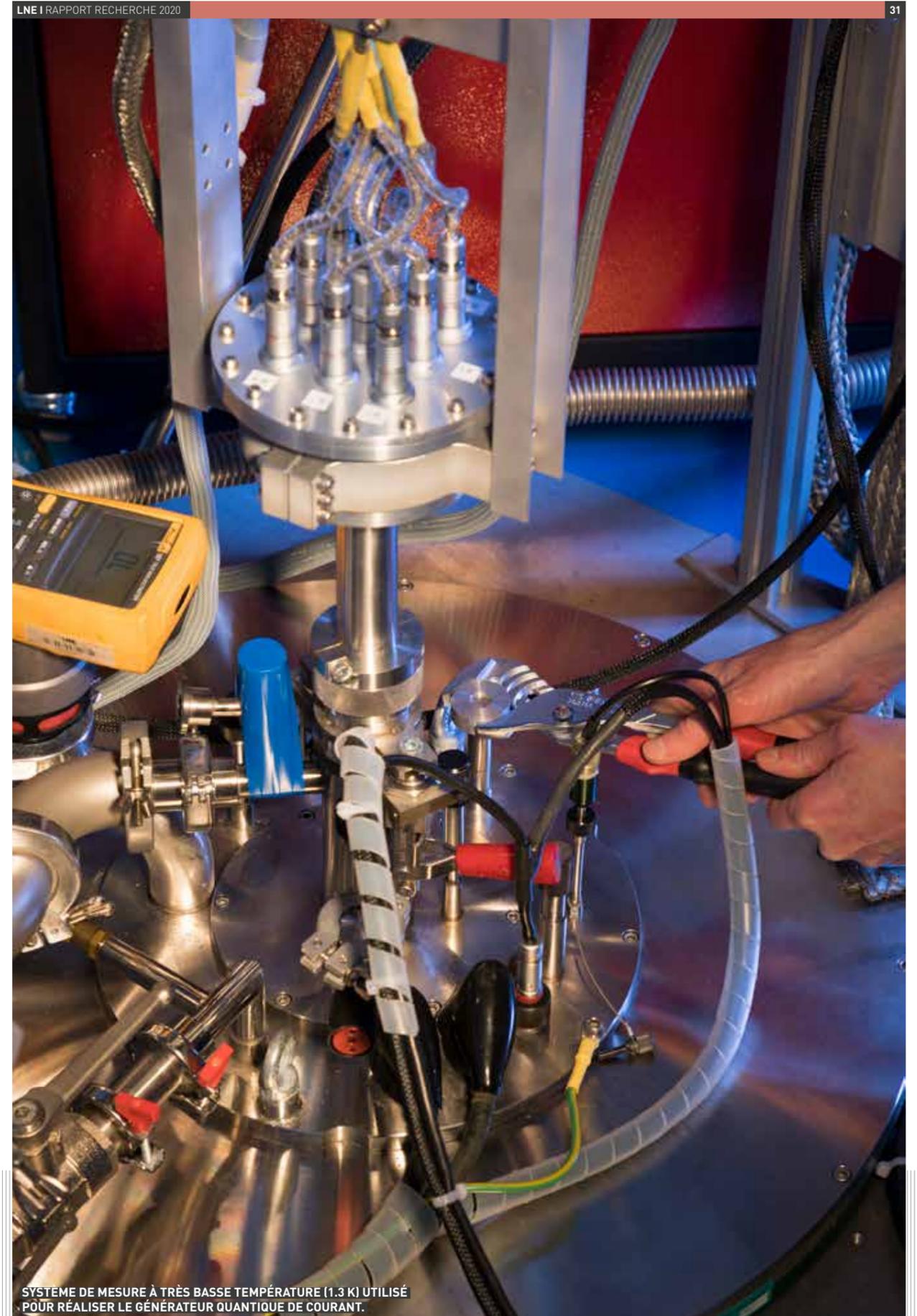
## GÉODÉSIE : UNE PRÉCISION SUBMILLIMÉTRIQUE EN LIGNE DE MIRE

Suivi de la hausse du niveau de la mer, anticipation des séismes, ingénierie de pointe dans la construction... les besoins en géodésie de précision vont croissants. C'est l'enjeu du projet européen GeoMetre, démarré en 2019, et auquel participe le LNE-LCM/Cnam aux côtés de 14 partenaires. Son objectif : l'amélioration des incertitudes associées aux référentiels géodésiques et le raccordement des différents types d'instruments de géodésie spatiale utilisés aujourd'hui.

Dans ce cadre, la tâche du laboratoire est double. D'une part, il s'agit pour les métrologues français de développer un système permettant de déterminer le point de référence, ou point invariant, des antennes de 10 m à 20 m de diamètre utilisées dans le cadre du système interférométrique VLBI (Very Long Baseline Interferometry). Celui-ci contribue à l'établissement des références terrestres en mesurant la distance entre les antennes d'un réseau mondial et des sources astronomiques lointaines.

Comme l'explique Jean-Pierre Wallerand, du LNE-LCM/Cnam « il s'agit d'un système composé de quatre têtes de mesure et de réflecteurs que nous installerons sur l'antenne du laboratoire de Wettzell, en Allemagne ». Celui-ci devrait permettre de réduire les incertitudes à moins de 1 mm contre quelques millimètres aujourd'hui.

D'autre part, le laboratoire français développe un télémètre laser pour mesurer des distances horizontales entre 5 km et 10 km. Validés métrologiquement par ailleurs, les résultats de mesure pourront être comparés à ceux obtenus à l'Observatoire de la côte d'Azur, par la technique SLR (Satellite Laser Ranging). Fondée sur la mesure de distances entre un observatoire sur Terre et des satellites dans l'Espace à l'aide d'un laser, cette technique est aujourd'hui limitée par les perturbations atmosphériques et ses incertitudes de mesure sont de quelques millimètres. Aux termes du projet, celles-ci devraient être ramenées sous la barre du millimètre. ■



SYSTÈME DE MESURE À TRÈS BASSE TEMPÉRATURE (1,3 K) UTILISÉ POUR RÉALISER LE GÉNÉRATEUR QUANTIQUE DE COURANT.

# PROGRAMME EMPIR : LA MÉTROLOGIE EUROPÉENNE AU SERVICE DE LA SOCIÉTÉ

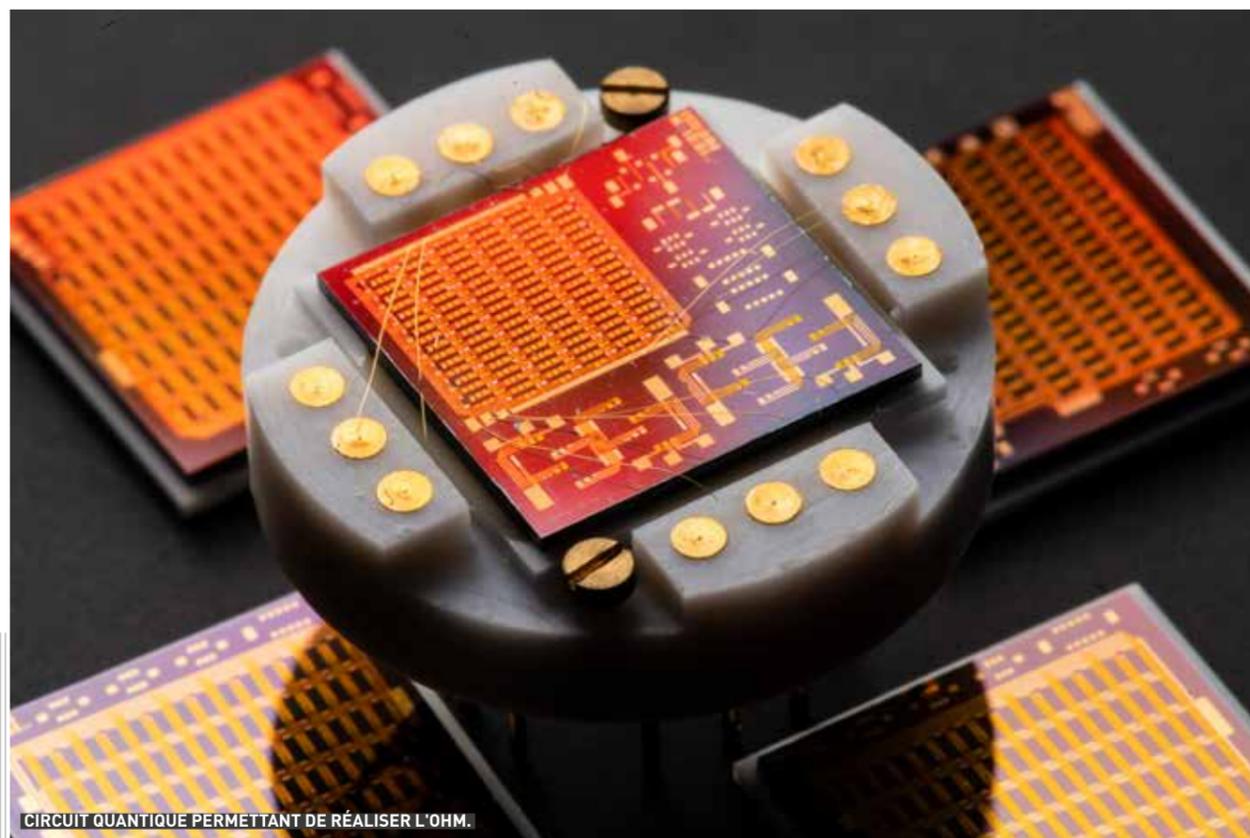
Le programme européen en métrologie EMPIR touche à sa fin. Il a contribué à remodeler le visage de la métrologie sur le continent. Résolument coopérative, celle-ci est désormais toute entière tournée vers les grands enjeux sociétaux.

Aux termes de sept années d'appels à projets, entre 2014 et 2020 – avec des projets encore en cours jusqu'en 2024 – le programme EMPIR touche à sa fin. Pour ce programme dédié à la métrologie au sein du 8e programme-cadre pour la recherche et l'innovation de la Commission européenne, Horizon 2020 (H2020), en ce début d'année 2021, c'est donc tout naturellement l'heure du bilan.

Et à cette heure, une chose est certaine, avec EMPIR, il y aura bien un avant et un après dans le paysage de la métrologie européenne. Comme le résume Maguelonne Chambon, directrice de la recherche scientifique et technologique du

LNE, «EMPIR a tout simplement changé la façon de travailler des métrologues en Europe.» Précisément, EMPIR a permis la coordination de l'ensemble des projets de métrologie à l'échelle du continent. Mieux, grâce à lui, la communauté métrologique européenne s'affiche désormais tel un acteur incontournable pour relever les grands défis du moment, qu'ils soient économiques, environnementaux ou sociétaux. Un programme au sein duquel les métrologues français n'ont pas démerité.

Historiquement, EMPIR s'inscrit à la suite des projets européens en métrologie débutés à la fin des années 2000. Ainsi, en 2008,



CIRCUIT QUANTIQUE PERMETTANT DE RÉALISER L'OHM.



SALLE BLANCHE

le projet iMERA-Plus, doté d'un budget de 64 millions d'euros a permis de démontrer à la Commission européenne la capacité de la communauté des métrologues européens à monter des projets de R&D. D'où une continuation avec le programme EMRP qui, avec un budget de 400 millions d'euros a permis aux chercheurs de 23 pays de participer à 119 projets entre 2009 et 2013. A sa suite, regroupant 28 pays et doté d'un budget total de 600 millions d'euros (la moitié à la charge de la Commission européenne, l'autre des états) répartis entre 236 projets, EMPIR a logiquement continué d'accompagner la montée en puissance de la métrologie européenne.

De son côté, sur 7 années, la France a engagé 27 millions d'euros dans EMPIR, soit 8,5 % du total du financement par les états, pour un taux de retour supérieur, soit 9,64 %. Plus précisément, le LNE et les laboratoires de la métrologie française ont été financés à hauteur de 18,16 millions d'euros par la Commission, correspondant à un taux de retour de 8,8 % parmi les NMI/DI européens. De leurs côtés, les autres entités (laboratoires académiques, industriels...) associées aux projets EMPIR affichent un taux de retour de 11,4 %, avec un budget alloué de 10,6 millions d'euros. En terme de projets, la métrologie française a participé à 113 d'entre eux et en a pilotés 24, soit 21,4 % de ceux dans lesquels elle était impliquée. Pour Maguelonne Chambon, «il y a deux raisons à ces chiffres favorables à la métrologie française. D'un côté, nos travaux sont fondés sur un socle solide de connaissances dans de nombreux domaines. De l'autre, nos chercheurs ont démontré leur grande capacité à s'adapter au nouveau paradigme proposé par les programmes de la Commission européenne.» Car au fil du temps, la tâche des métrologues a évolué.

La directrice poursuit : «il y encore une quinzaine d'années, on parlait de métrologie par grandeur ou par unité : la seconde, le mètre, le kilogramme... Et le travail des métrologues consistait à développer et maintenir les références, entre autres. Mais avec l'EMRP et encore plus EMPIR, leur activité s'est considérablement élargie. Partant des besoins concrets des utilisateurs, il s'agit en plus de proposer des solutions concrètes de dissémination des unités, d'adresser par ailleurs toutes les grandeurs qui en dérivent et enfin d'apporter des réponses à des problématiques transversales et sociétales.»

Concrètement, le programme EMPIR s'est vu structurer en trois grands volets : un volet fondamental autour du Système international d'unités (SI), un autre sur les grands défis sociétaux que sont notamment l'environnement, la santé et l'énergie, et enfin un dernier spécifique aux problématiques de métrologie pour l'industrie.

Sur le plan des avancées fondamentales, la période couverte par EMPIR s'est distinguée par la refonte du SI qui a vu quatre de ses sept unités changer de définition. Par ailleurs, toutes ont été redéfinies à partir d'une constante fondamentale de la physique dont il a fallu fixer la valeur de manière définitive. Dans cette entreprise, les métrologues français ont eu un rôle actif par leurs travaux pour la redéfinition du kilogramme, du kelvin et de l'ampère.

Dans l'esprit du programme EMPIR, les spécialistes se sont aussi attelés à la question de la dissémination de ces nouvelles unités. «Ce n'est pas le tout de disposer d'une nouvelle définition du kelvin fondée sur la constante de Boltzmann de la thermodynamique. Encore faut-il pouvoir offrir aux industriels la possibilité de la mettre en œuvre», cite par exemple



PLATEFORME EXPÉRIMENTALE POUR L'ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE MICRO-CAPTEURS POUR LA QUALITÉ DE L'AIR.

Maguelonne Chambon. Par ailleurs, plusieurs projets ont été menés sur les unités thermiques dérivées, notamment dans le but de réaliser des références qui permettent de définir la résistance thermique des matériaux, données indispensables pour s'attaquer efficacement à la rénovation thermique des bâtiments dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique et l'efficacité énergétique. De la même manière, on peut citer la seconde, qui fait actuellement l'objet d'importants travaux fondamentaux en vue de sa redéfinition prochaine ; les spécialistes travaillent dans le même temps sur des liaisons par fibres optiques permettant de disséminer des signaux de fréquence de très haute précision, aussi bien à destination des universités que d'entreprises.

Concernant les grands défis sociétaux, «la métrologie française a été au rendez-vous», juge Maguelonne Chambon. Y compris sur les thématiques où nous n'étions pas forcément bien identifiés et où on a assisté à une montée en puissance. C'est en particulier le cas dans le domaine de la santé où une directive oblige depuis 2016 les laboratoires d'analyses médicales à se raccorder à des références tracées pour le dosage des biomarqueurs. «Par la force des choses, cela a eu pour effet de nous rapprocher de ces entités qui avant ne nous connaissaient pas bien», détaille la chercheuse. Par ailleurs, plusieurs projets ont eu pour thème les rayonnements ionisants, la radiothérapie par exemple, dont la métrologie est à l'évidence critique pour les patients.

«On peut également citer le domaine de la nanométrie qui est transverse à la santé et l'environnement, poursuit la spécialiste. Ce qui est intéressant c'est qu'il y a à peine 15 ans, nous n'imaginions pas tous ces besoins. Ils nous ont claire-

ment été dictés par la société.» Comme c'est encore le cas pour de nombreux projets en géodésie, sur la navigation et la localisation, les technologies quantiques ou l'apparence. «Liées à l'œil humain, nous avons dû définir pour cette dernière thématique des grandeurs atypiques», précise Maguelonne Chambon. Nous ne nous y intéressions peu alors qu'elles revêtent une très grande importance pour les industriels.»

Ces derniers ont par ailleurs fait montre d'un intérêt tout particulier pour les projets dits pré-normatifs d'EMPIR, consacrés à des travaux en amont de la normalisation, et auxquels ont été consacrés 10 % du budget du programme. Le constat de départ : il n'existait pas beaucoup d'interaction entre la recherche en métrologie et les commissions de normalisation, d'où parfois des aberrations avec des normes impossibles à mettre en place faute de moyens métrologiques permettant de les faire respecter. «Sur la qualité de l'air, les bâtiments ou encore la micro-fluidique, l'éclairage ou les réseaux électriques, nous avons réalisé des enquêtes et des interviews auprès des professionnels afin de répondre au plus près de leurs besoins», explique la scientifique. Une plateforme a par ailleurs été créée pour les recueillir, plateforme entre EURAMET et le CEN-CENELEC, dont la France a assuré la présidence durant tout le déroulement du programme.

Outre le rapprochement avec les industriels, EMPIR a également eu pour effet de resserrer les liens existants et d'en créer de nouveaux entre la communauté métrologique et les autres entités de recherche. Celles-ci sont en effet été mobilisées à hauteur de 90 millions d'euros par le programme européen, dans le but de faire bénéficier les collaborations de compétences complémentaires de celles des laboratoires de



«la métrologie française a été au rendez-vous, y compris sur les thématiques où nous n'étions pas forcément bien identifiés et où on a assisté à une montée en puissance.»  
Maguelonne Chambon, Directrice de la Recherche Scientifique et Technologique.

métrologie. «Cette disposition a été très bénéfique, se félicite Maguelonne Chambon. Outre le CNRS et le CEA, nous nous sommes ainsi rapprochés de différentes universités, de CHU et de l'INSERM, mais également d'industriels, tels Air liquide ou Thalès que nous avons comme prestataires, mais que nous n'avons pas forcément identifiés comme partenaires pour la R&D. Nous avons aussi tissé des liens avec des PME comme par exemple POLLEN.»

Une chose est sûre, à la suite des programmes EMRP et EMPIR, la métrologie européenne est parvenue à un haut niveau de maturité caractérisé par une forte capacité de coopération entre les différentes parties concernées. C'est dans ce contexte qu'a démarré au début de cette année le 9<sup>ème</sup> programme-cadre pour la recherche et l'innovation de la Commission européenne, Horizon Europe, dont le volet métrologie sera doté d'un budget de 700 millions d'euros. Signe particulier, celui-ci sera également le dernier 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.

Ainsi, EURAMET a lancé en 2019 une série de réseaux européens pour la métrologie ou EMN (European Metrology Networks). 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 ce jour les EMN couvrent les thématiques suivantes : mathématiques et statistiques pour la métrologie, traçabilité pour les analyses médicales, technologies quantiques, réseaux électriques intelligents, observation du climat et des océans et les gaz pour l'énergie. D'autres sont en préparation que ce soit sur la réglementation pour la radioprotection, la fabrication avancée, l'utilisation des rayonnements ionisants dans le domaine médical, les énergies «vertes» ou encore sur la pollution. D'un mot, ils se concentrent sur l'ensemble des grands défis définis par la Commission européenne pour Horizon Europe.

«Après avoir appris à coopérer, nous devons maintenant mieux nous coordonner dans la durée», analyse Maguelonne Chambon. L'objectif à terme doit être désormais la

création de plates-formes communes permettant la mise en commun des moyens de la métrologie à l'échelle européenne. Par ailleurs, nous devons encore accroître notre visibilité, afin que nos partenaires potentiels comprennent en amont qu'ils ne pourront pas faire l'impasse sur la métrologie.» Pas plus que la société dans son ensemble. Grâce à EMPIR, le travail est clairement amorcé. Reste à l'installer dans la durée. ■



MICROSCOPE A FORCE ATOMIQUE METROLOGIQUE.

# AMPÈRE À L'HONNEUR EN 2020

L'année 2020 a été celle du 200<sup>e</sup> anniversaire de la naissance de l'électrodynamique grâce aux découvertes d'André-Marie Ampère. Pour célébrer cet anniversaire, sous l'égide de la Société de l'Électricité, de l'Électronique et des Technologies de l'Information et de la Communication (SEET) et de la Société des Amis d'André-Marie Ampère, les communautés scientifiques et industrielles, dont le LNE, se sont associées pour mettre à l'honneur Ampère.

## LA JOURNÉE AMPÈRE 2020

Placée sous le haut patronage de Madame Frédérique Vidal, Ministre de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, la journée Ampère 2020, qui s'est tenue le 23 novembre 2020, a réuni historiens, ingénieurs, physiciens, chercheurs, enseignants, industriels, pour revenir et échanger sur les travaux d'Ampère et leurs implications actuelles. Les participants à cette journée de conférences et d'échanges ont été accueillis par Gérard Mourou, prix Nobel de physique 2018 et parrain du projet Ampère 2020. Au cours de cette

journée, temps fort de cette année de commémorations, Wilfrid Poirier, ingénieur de recherche en métrologie quantique au LNE, a donné une conférence intitulée «L'unité ampère : de l'électrodynamique à la mécanique quantique». Le LNE s'est par ailleurs largement impliqué dans ce projet Ampère 2020 en étant membre du Comité National Ampère, constitué pour gérer l'organisation tout au long de l'année de diverses manifestations et la création de ressources pédagogiques. ■

## FÊTE DE LA SCIENCE 2020 : LA MÉTROLOGIE ÉLECTRIQUE



À l'occasion de la Fête de la Science, le LNE a profité des célébrations des travaux d'André-Marie Ampère pour organiser une visite virtuelle de ses laboratoires de métrologie électrique. Cette visite exclusive au cœur de laboratoires de pointe, toujours disponible sur <https://visite-virtuelle.lne.fr/>, permet de présenter toute l'étendue de cette discipline et de ses implications. Étalonnage des appareils électriques, propriétés électriques à l'échelle nanométrique, étalons quantiques de courant, nouvelle définition du kilogramme, sont au programme de cette visite.

Une série de portraits vidéos d'ingénieurs et de chercheurs du LNE a également été réalisée pour valoriser les métiers autour de l'électricité et du magnétisme. ■



# HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

## LNE-LNHB/CEA

**Xavier Mougeot**, le 17 janvier 2020  
«*Transitions par interaction faible en métrologie des rayonnements ionisants : de la physique fondamentale aux applications*». ■

# DISTINCTION

## MÉDAILLE DE L'INNOVATION DU CNRS 2020

**Arnaud Landragin**, Directeur du laboratoire SYstèmes de Référence Temps-Espace (SYRTE),

récompensé pour ses travaux dans le domaine de la gravimétrie atomique et leur transfert vers l'industrie (développements de capteurs ultra précis pour des applications en géosciences).

L'innovation récompensée est un capteur interférométrique à atomes froids ; objet d'un brevet, elle a été à l'origine de la société Muquans qui commercialise désormais des gravimètres absolus à atomes froids, compact et transportables, et aux performances (sensibilité, stabilité...) inégalées sur le marché mondial. ■

# THÈSES DE DOCTORAT SOUTENUES

## LNE-LCM/LNE

**Loïc Crouzier**, le 17 juillet 2020  
«*Développement d'une nouvelle approche hybride combinant AFM et MEB pour la métrologie dimensionnelle des nanoparticules*». ■

## LNE-LNHB/CEA

**Abhilasha Singh**, le 25 septembre 2020  
«*Étude métrologique de la forme des spectres bêta et validation expérimentale des modèles théoriques*». ■

## LNE-SYRTE/OP

**Joannès Barbarat**, le 21 septembre 2020  
«*Développement d'une source laser IR & visible, compacte, fibrée, stabilisée en fréquence*». ■

## LNE-LADG

**Marc-Antoine Lambert**, le 18 décembre 2020  
«*Contribution à l'étude des écoulements dans les tuyères soniques cylindriques*». ■

**Étienne Savalle**, le 16 novembre 2020  
«*Tester la relativité générale avec des horloges dans l'espace, et explorer les possibilités de détection de matière noire avec des atomes froids dans l'espace et au sol*». ■

# LE RÉSEAU NATIONAL DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE

## LES LABORATOIRES NATIONAUX DE MÉTROLOGIE

### LNE-LCM/LNE-Cnam

Le Laboratoire commun de métrologie entre le LNE et le Conservatoire National des Arts et Métiers intervient pour les domaines en métrologie des longueurs, des rayonnements optiques, de la température et des grandeurs thermiques, de la masse et des grandeurs apparentées (pression, force, couple, acoustique, accélérométrie, viscosité).

### LNE

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

### LNE-LNHB/CEA

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

### LNE-SYRTE/OP

Le Laboratoire des Systèmes de Référence Temps-Espace à l'Observatoire de Paris est chargé de la réalisation des références dans le domaine du temps-fréquence.

## LES LABORATOIRES ASSOCIÉS AU LNE

### LNE-CETIAT

Le Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques est chargé de l'hygrométrie, la débitmétrie liquide-eau et l'anémométrie.

### LNE-ENSAM

L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris est en charge des références de pression dynamique.

### LNE-IRSN

L'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire est chargé de la dosimétrie des neutrons.

### LNE-LADG

Le Laboratoire Associé de Débitmétrie Gazeuse, 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 fréquence.

### 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. 1, 3, 6, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 21, 24, 25, 32, 33, 34, 35 - Guillaume Grandin : 31  
LNE : 9, 14, 19, 23, 26, 36 - LNE-LNHB : 16 - LNE-Syrte : 28, 29 - Adobe Stock : 17, 22 - Istock : 8 - Fotolia : 10 - DR

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

lne.fr



CRÉER  
LA  
CONFIANCE