

RAPPORT RECHERCHE  
2018

# ÉDITORIAL

**Thomas GRENON,**  
Directeur général



2018 fut sans nul doute une année historique pour la métrologie ! La redéfinition des unités du Système international (SI) actée en novembre lors de la 26<sup>ème</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a marqué un tournant dans le monde de la mesure : la dématérialisation de toutes les unités du SI, et en particulier celle du kilogramme dont la définition n'avait pas évolué depuis 1889. Un tournant auquel les chercheurs du LNE et du Réseau national de la métrologie française ont largement contribué grâce à leurs travaux menés depuis de nombreuses années, je pense en particulier à notre contribution à la dématérialisation du kilogramme grâce à notre balance du watt, une des trois au monde et la seule en Europe, et à notre contribution à la nouvelle définition du kelvin, avec des travaux ayant permis de déterminer la constante de Boltzmann ( $k$ ) au meilleur niveau mondial. Cet événement historique a aussi été l'occasion de mettre en lumière l'apport majeur de la métrologie à notre société, à la sécurité de nos concitoyens, à la compétitivité de nos entreprises et de positionner notre établissement comme un acteur incontournable de la recherche au niveau national et international.

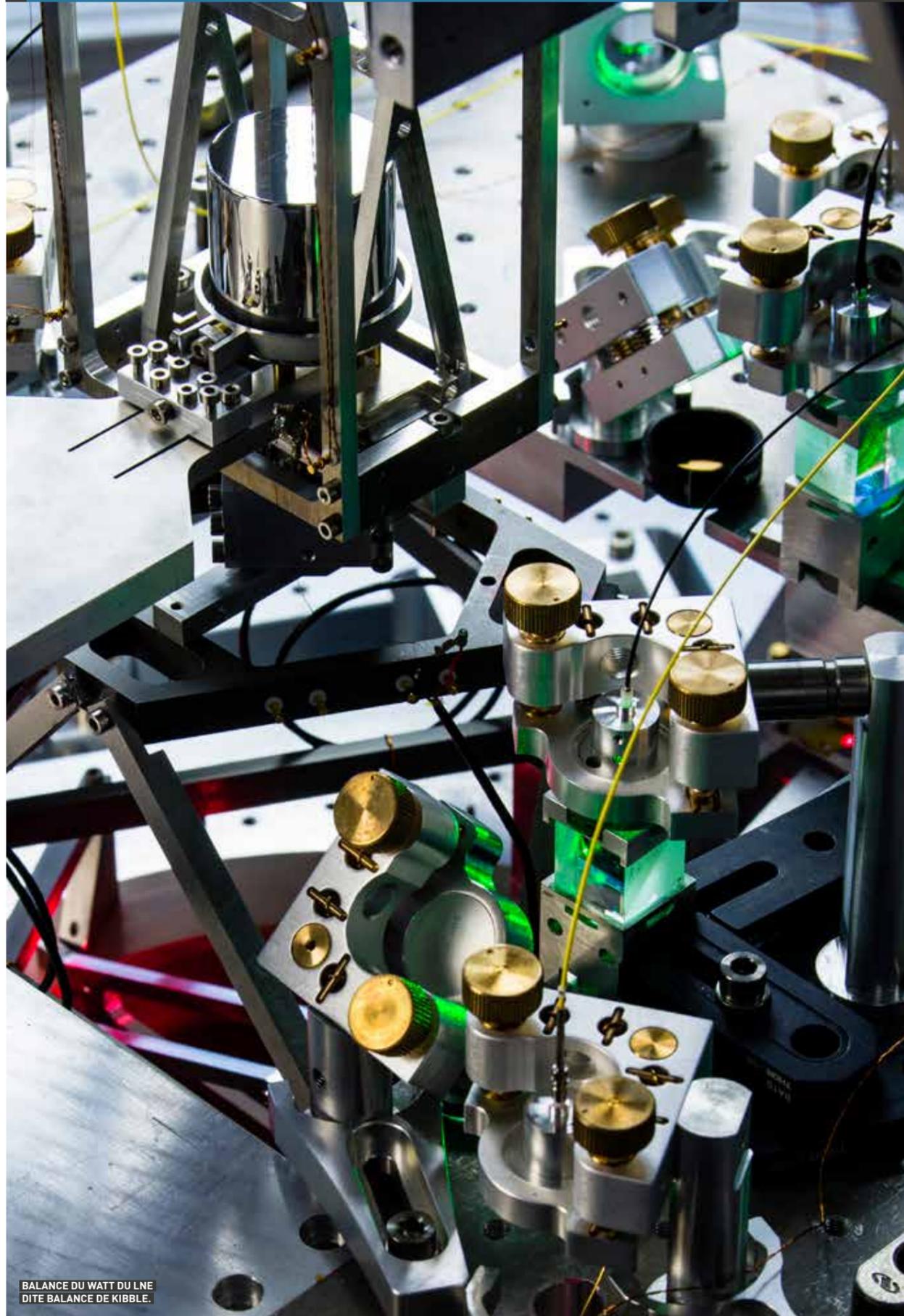
Parmi ces travaux, nous avons notamment récompensé, à l'occasion du 10<sup>ème</sup> anniversaire de notre Prix de la recherche, deux chercheurs en métrologie électrique quantique ayant largement contribué à la nouvelle définition de l'ampère.

Fiabilité des analyses médicales, stockage de l'hydrogène, mesure de radioactivité, fabrication additive, intelligence artificielle, nanotechnologies. Cette année encore la diversité des thématiques de recherches couvertes par le LNE témoigne de toute la richesse des projets menés par nos équipes. Que ce soit pour la protection des citoyens ou pour accompagner les innovations de rupture, le LNE met tout en œuvre pour faire progresser nos connaissances en métrologie et pour garantir un monde plus sûr et innovant. ■

# SOMMAIRE

<b>Editorial</b> .....	<b>3</b>
<b>Le LNE en 2018</b> .....	<b>6</b>
<hr/>	
<b>Santé : garantir la sécurité des citoyens</b> .....	<b>8</b>
• Analyses médicales : des échantillons représentatifs pour évaluer la fiabilité .....	9
• Curiethérapie : vers de nouvelles références .....	10
• La traçabilité des produits radio-pharmaceutiques à très faible durée de vie à portée de main .....	10
• Doséo affine les mesures absolues de doses de ses installations .....	11
• Radioprotection : un accélérateur d'électrons pour mimer les faisceaux de référence .....	11
<b>Environnement : contribuer à un monde durable</b> .....	<b>12</b>
• Surveillance des activités nucléaires : la précision métrologique en ligne de mire ..	13
• La métrologie des nano-aérosols : vers une caractérisation dédiée .....	14
• Un réseau européen en métrologie pour le climat et l'océan .....	15
• METRODECOM II : des étalons pour le démantèlement nucléaire .....	15
• Le projet Eura-Thermal accroît la robustesse des mesures thermiques en Europe .....	16
• Métrologie de l'hydrogène : un banc de mesure pour maximiser la charge des hydrures .....	16
• Un étalon de courant haute fréquence fiable à des intensités de 10 ampères .....	17
<b>Industrie du futur : accompagner l'innovation</b> .....	<b>18</b>
• Références temps-fréquence : la précision de la fibre accessible à tous .....	19
• Les faibles pressions mesurées "à la loupe" .....	20
• Impression 3D : la précision métrologique en ligne de mire .....	20
• Mesures de couple de torsion : le nouveau banc complet et opérationnel .....	21
• Life Farbioty : du lin pour la construction ferroviaire .....	21
• Des intelligences artificielles pour désherber .....	22
• En route vers une métrologie pour l'intelligence artificielle .....	22
• Hygrométrie : l'étalonnage à haute température et en dynamique désormais opérationnel au LNE-CETIAT .....	23

<b>Matériaux de demain : maîtriser les enjeux</b> .....	<b>24</b>
• Incinération des déchets : la toxicité des nanoparticules en question .....	25
• Alimentation : un matériau "barrière" recyclable .....	26
• Le rayonnement Synchrotron pour la métrologie des nanocouches .....	27
• La naissance d'une métrologie électrique pour les circuits 3D .....	27
• Le nano-monde à la précision du... nanomètre .....	28
<hr/>	
<b>Retour sur CPEM 2018</b> .....	<b>29</b>
<hr/>	
<b>Système international d'unités : une année historique</b> .....	<b>30</b>
• Révision du système international d'unités .....	31
• La seconde optique en ligne de mire .....	33
<b>Le SI dans la presse</b> .....	<b>34</b>
<b>Des événements tournés vers le grand public</b> .....	<b>36</b>
• Cycle de conférences sur les unités de mesure du SI .....	36
• Fête de la science .....	37
• Exposition "Sur mesure, les 7 unités du monde" .....	37
<hr/>	
<b>Le Prix LNE de la recherche</b> .....	<b>38</b>
<b>Habilitations à diriger les recherches</b> .....	<b>40</b>
<b>Thèses</b> .....	<b>41</b>
<b>Le réseau national de la métrologie française</b> .....	<b>42</b>



BALANCE DU WATT DU LNE  
DITE BALANCE DE KIBBLE.

## LA RECHERCHE AU LNE EN 2018, C'EST :

—  
**25 %**  
du budget  
global du LNE

—  
**85**  
projets de recherche

—  
**70**  
publications  
dans des revues  
à comités de lecture

—  
**18**  
doctorants

—  
**200** docteurs  
et ingénieurs

—  
Un portefeuille  
de **14** brevets

## LA RECHERCHE DU RÉSEAU NATIONAL DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE EN 2018, C'EST :

—  
**148**  
projets de recherche  
dont 60 JRP (*Joint Research Program*)

—  
**156**  
publications  
dans des revues  
à comités de lecture

—  
**250**  
communications

—  
**50**  
thèses en cours



## SANTÉ : GARANTIR LA SÉCURITÉ DES CITOYENS

## ANALYSES MÉDICALES : DES ÉCHANTILLONS POUR AMÉLIORER LA FIABILITÉ

**Le LNE a développé des échantillons représentatifs de ceux des patients dont les valeurs cibles sont certifiées pour évaluer la fiabilité de plusieurs tests médicaux.**

La qualité du parcours de soin d'un patient dépend de celle des examens auxquels il est soumis. Or s'agissant des analyses médicales, les différentes méthodes utilisées par les laboratoires pour doser les marqueurs biologiques ne sont pas d'égales performances, pouvant conduire à des résultats contradictoires et difficiles à comparer.

Ainsi, en 2016, l'Agence nationale de sécurité du médicaments et des produits de santé (ANSM) a demandé au LNE de produire des échantillons utilisés dans le cadre du contrôle national de qualité obligatoire, auquel ont été tenus de participer l'ensemble des laboratoires de biologie médicale. Pour la première fois cette année, ce contrôle a reposé sur des matériaux de référence certifiés commutables.

Concrètement, l'objectif des chercheurs du laboratoire était double. D'une part, certifier les valeurs cibles des échantillons par des méthodes de référence validées internationalement. «Jusqu'à alors, on prenait pour valeur cible la moyenne des résultats obtenus par l'ensemble des participants, d'où d'importants risques d'erreur d'interprétation possibles», précise Vincent Delatour, un des chercheurs impliqués dans cette étude. D'autre part, il faut garantir ce que les spécialistes appellent la commutabilité des échantillons, c'est-à-dire le fait qu'ils miment de manière satisfaisante le comportement d'échantillons réels.

De fait, pour des tests d'une telle ampleur, il est impossible d'utiliser le sang d'un seul patient, d'où le recours à des mélanges. Or en 2016, les chercheurs du LNE ont montré qu'en fonction de la manière dont ces échantillons sont élaborés, ils peuvent présenter des propriétés qui les éloignent d'échantillons réels et pouvant causer d'importants biais dans les dosages. La conséquence a été la réalisation d'un important travail par les chercheurs pour sélectionner les meilleurs échantillons et garantir leur teneur en glucose (marqueur du diabète), en créatinine (marqueur de l'insuffisance rénale) et en cholestérol. «Formidable vitrine pour le laboratoire, notre apport au contrôle national de l'ANSM est l'aboutissement de 10 ans de travail dans le développement de méthodes permettant de raccorder les dosages médicaux au système international d'unités», se félicite le scientifique.

Un travail qui se poursuit désormais pour d'autres bio-marqueurs impliqués dans le dépistage de maladies neuro-dégénératives, la septicémie et les maladies cardiovasculaires. De quoi, à terme, produire des matériaux de référence pour l'étalonnage des méthodes de routine.

«Formidable vitrine pour le laboratoire, notre apport au contrôle national de l'ANSM est l'aboutissement de 10 ans de travail.»

Vincent Delatour, expert biomédical-biomarqueurs.

### LE RISQUE CARDIOVASCULAIRE À LA LOUPE

Le risque cardiovasculaire est déterminé à partir du dosage de différents lipides, dits marqueurs conventionnels. Or le risque réel pour le patient de développer des maladies cardiovasculaires dépend souvent moins de la concentration absolue de ces molécules (cholestérol, triglycérides...) dans le sang, que

de la concentration des lipoprotéines ou des nanoparticules biologiques qui transportent le cholestérol dans le sang. D'où l'idée des chercheurs du LNE de développer de nouvelles méthodes de référence issues des nanotechnologies permettant de les mettre en évidence. «Les méthodes sont prêtes et les étalons sont disponibles», précise Vincent Delatour. Aux laboratoires désormais de s'en emparer ! ■



DÉVELOPPEMENT DE MATÉRIAUX DE RÉFÉRENCE CERTIFIÉS POUR LES ANALYSES MÉDICALES.

## CURIETHÉRAPIE : VERS DE NOUVELLES RÉFÉRENCES

Fondée sur l'introduction d'une source active dans le corps du patient, la curiethérapie permet de délivrer des doses importantes au volume cible, typiquement une tumeur, en épargnant les autres tissus. Outre les sources d'iridium 192 ( $^{192}\text{Ir}$ ), de plus en plus de centres de soins utilisent désormais des sources de cobalt 60 ( $^{60}\text{Co}$ ). A courbes de distribution de dose comparables, ce dernier élément présente en effet une durée de vie plus longue qui simplifie la logistique notamment celle relative aux règles de radioprotection en termes de transport et de renouvellement.

Dans ce contexte, le LNE-LNHB a renouvelé en 2018 son projecteur de sources de curiethérapie, portant son choix sur un projecteur pouvant alternativement être chargé en  $^{192}\text{Ir}$  et en  $^{60}\text{Co}$ . Afin d'établir de nouvelles références pour l'éta-

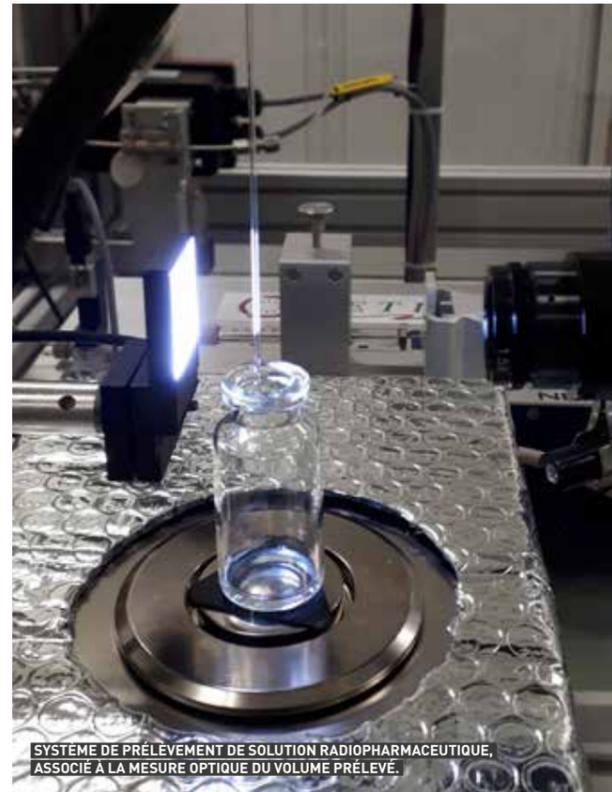
nage des sources cliniques de curiethérapie, le laboratoire a commencé par étalonner une chambre d'ionisation à cavité à partir de ses faisceaux caractérisés métrologiquement. A la suite de quoi, il a caractérisé avec cette même chambre, la source d' $^{192}\text{Ir}$  de son nouveau projecteur. «*Précisément, l'année passée, nous avons établi une nouvelle référence pour l' $^{192}\text{Ir}$ , détaille Isabelle Aubineau-Lanièce, directrice du laboratoire. Et nous devrions bientôt terminer d'établir celle relative au  $^{60}\text{Co}$ .*» Un centre de soin pourra alors envoyer pour étalonnage au LNE-LNHB son propre dosimètre médical, ce dernier servant ensuite à caractériser *in situ* les sources médicales. Ainsi, le laboratoire renouvelle son offre d'étalonnage pour l' $^{192}\text{Ir}$  et comble l'absence de référence pour le  $^{60}\text{Co}$ . ■

## LA TRAÇABILITÉ DES PRODUITS RADIOPHARMACEUTIQUES À TRÈS FAIBLE DURÉE DE VIE À PORTÉE DE MAIN

Avant injection, un produit radio-pharmaceutique doit faire l'objet d'une mesure d'activité au moyen d'un activimètre étalonné. Cependant, pour les produits à très faible durée de vie – quelques minutes – il n'existe pas d'étalon primaire d'activité. En effet, il est matériellement impossible d'amener les solutions radioactives de leur lieu de production au site où sont réalisées les mesures primaires avec un dispositif servant ensuite pour les étalonnages. Pour pallier ce manque, les chercheurs du LNE-LNHB, en collaboration avec leurs collègues du LNE-CETIAT, ont développé un moyen de mesure primaire transportable sur le site de production des radioéléments.

Pour ce faire, les spécialistes ont tiré parti d'un dispositif de mesure d'activité portable développé au LNE-LNHB. Par ailleurs, afin de recueillir des nano-volumes certifiés des produits à analyser, ils ont proposé un système de prélèvement utilisant un capillaire et un moyen de mesure optique. Comme l'explique Philippe Cassette, responsable du projet, «*au laboratoire, on utilise une balance de précision pour prélever quelques microgrammes. Mais ces moyens sont impossibles à déplacer sur les sites de production.*» Avantage supplémentaire s'agissant de la manipulation de liquides à très haute activité : l'ensemble est automatisé, permettant aux opérateurs d'intervenir à distance.

Validés au laboratoire, les deux sous-systèmes sont prêts à être intégrés et l'ensemble sera testé dans le courant de l'année au service hospitalier Frédéric Joliot, à Orsay. De quoi établir la première chaîne traçable pour les radioéléments à très faible durée de vie. ■



SYSTÈME DE PRÉLÈVEMENT DE SOLUTION RADIOPHARMACEUTIQUE, ASSOCIÉ À LA MESURE OPTIQUE DU VOLUME PRÉLEVÉ.



## DOSEO AFFINE LES MESURES ABSOLUES DE DOSES DE SES INSTALLATIONS

Opérationnelle depuis début 2015, la plateforme DOSEO, au LNE-LNHB, propose des installations pour la recherche en radiothérapie et l'étalonnage des dosimètres utilisés par les centres médicaux pour étalonner leur propres accélérateurs. Dans ce contexte, les scientifiques viennent d'établir les références métrologiques de l'accélérateur TrueBeam VARIAN de la plateforme. De quoi diminuer les incertitudes sur la chaîne tracée reliant les étalons primaires aux utilisateurs finaux.

Pour mesurer la dose délivrée par l'accélérateur, les chercheurs ont utilisé un calorimètre à eau. Comme l'explique Benjamin Rapp, responsable du programme, «*le principe de la méthode consiste à mesurer la quantité de chaleur déposée par un faisceau de photons ou d'électrons dans un volume d'eau via l'élévation de température de*

*quelques milli-kelvins qui en résulte. On peut alors remonter à la dose absolue délivrée par les faisceaux.*»

Concrètement, pour ce faire, les physiciens ont adapté un calorimètre développé au LNE-LNHB dans le cadre d'un projet de mesure de doses délivrées par des faisceaux de rayons X. Par ailleurs, ils ont dû réaliser un important travail théorique afin de déterminer différents facteurs correctifs. En particulier, afin de corriger les mesures de la quantité de chaleur absorbée par le récipient contenant l'eau du calorimètre.

In fine, les incertitudes sur la dose absolue délivrée par l'accélérateur ont été améliorées d'un facteur deux par rapport à celles issues des mesures sur les anciennes installations du laboratoire. Des résultats fins prêts à être utilisés pour l'étalonnage en routine des instruments médicaux. ■

## RADIOPROTECTION : UN ACCÉLÉRATEUR D'ÉLECTRONS POUR MIMER LES FAISCEAUX DE RÉFÉRENCE

Réacteurs nucléaires, accélérateurs de particules... pour se protéger des rayonnements ionisants, les professionnels du nucléaire utilisent des appareils qui mesurent les doses auxquelles ils sont exposés. Grâce à une collaboration entre le LNE-LNHB et le laboratoire ATRON de la société CERAP, ces instruments seront désormais étalonnés plus facilement. Jusqu'alors, cette opération nécessitait de recourir à des faisceaux de référence émis par des sources radioactives de césium et de cobalt. Or l'utilisation de ces dernières est contraignante. De plus, comme l'explique Valentin Blideanu, responsable du projet au LNE-LNHB, «*en France, la réglementation impose de renouveler ces sources tous les 10 ans, ce qui place les entreprises offrant un service d'étalonnage*

*en tension par rapport à leurs homologues des autres pays d'Europe où la réglementation est différente.*»

Pour y remédier, les spécialistes français ont donc défini une nouvelle solution d'étalonnage : elle consiste en un accélérateur d'électrons à l'origine d'un rayonnement équivalent à celui produit par des éléments radioactifs. «*Après son installation dans les locaux d'ATRON, à Cherbourg, nous nous sommes déplacés avec nos instruments de mesure primaires afin d'assurer son raccordement à nos faisceaux de référence*», explique le scientifique. De quoi offrir un service d'étalonnage désormais compétitif et par ailleurs fondé sur une solution sans équivalent. ■



## ENVIRONNEMENT : CONTRIBUER À UN MONDE DURABLE



NOUVELLE INSTALLATION MÉTROLOGIQUE POUR LES GAZ RADIOACTIFS.

## SURVEILLANCE DES ACTIVITÉS NUCLÉAIRES : LA PRÉCISION MÉTROLOGIQUE EN LIGNE DE MIRE

Une nouvelle installation primaire permettra bientôt d'assurer la traçabilité des mesures de très faible activité réalisées pour garantir le respect des traités d'interdiction des essais nucléaires.

La surveillance du respect des traités d'interdiction des essais nucléaires se fonde notamment sur un réseau de mesure d'activité d'isotopes des gaz rares exclusivement produits lors d'un incident ou d'une explosion nucléaire. Il s'agit alors de détecter une activité certes sans équivoque, mais associée à des éléments présents en très faible concentration dans l'atmosphère et dont l'activité, par conséquent, est typiquement de 10 000 à 100 000 fois moins intense que la radioactivité naturelle. Or pour de tels niveaux, il n'existait pas d'étalon primaire tracé pour l'étalonnage des instruments de mesure. Ce à quoi les chercheurs du LNE-LNHB ont remédié.

Plus précisément, les métrologues disposent depuis longtemps d'étalons de gaz rares pour les fortes activités. Ceux-ci se présentent sous la forme de bouteilles certifiées que l'on connecte à un instrument de mesure pour l'étalonner. Pour les étalonnages à faible activité, les scientifiques diluaient le contenu de la bouteille. Mais en l'absence de méthode de référence pour cette opération, la traçabilité au Système international d'unités n'était in fine pas assurée.

Ainsi, les spécialistes du LNE-LNHB ont développé un banc dédié. Premier objectif : certifier la dilution du gaz contenu dans les bouteilles étalons. « Pour ce faire, l'essentiel était de parvenir à mesurer avec une très grande précision le volume interne, complexe, de l'installation dans laquelle a lieu cette dilution », explique Benoît Sabot, responsable du projet.

« L'essentiel était de parvenir à mesurer avec une très grande précision le volume interne, complexe, de l'installation. »

Benoît Sabot, responsable du projet au LNE-LNHB.

Pour y parvenir, les scientifiques ont ainsi utilisé un volume de gaz étalon du LNE, couplé à des mesures thermodynamiques permettant de relier le volume d'un gaz à une pression donnée à celui de ce même gaz à une pression différente.

Par ailleurs, afin de certifier l'activité du gaz dilué, les chercheurs développent actuellement une technique originale fondée sur l'utilisation d'un scintillateur poreux présentant une très grande surface de contact. Avantage : un rendement de détection proche de 100 %, particulièrement adapté aux très faibles activités. De plus, le recours à un scintillateur solide évite la manipulation souvent peu aisée des scintillateurs liquides couramment utilisés.

Bientôt opérationnel, notamment au terme d'une campagne de comparaisons entre laboratoires, ce moyen primaire permettra d'étalonner des appareils de mesures aussi bien en les plaçant dans la chambre de l'installation qu'en les y connectant depuis l'extérieur.

Mieux, les métrologues travaillent actuellement à une version transportable de leur dispositif permettant de réaliser des étalonnages directement sur site. Comme le précise le responsable, « l'aspect portatif est acquis et nous devons maintenant y intégrer le scintillateur poreux. »

De quoi, à terme, garantir enfin la traçabilité des mesures de surveillance des activités nucléaires, et, ce faisant, renforcer la crédibilité d'une activité politiquement sensible. ■

## LA MÉTROLOGIE DES NANO-AÉROSOLS : VERS UNE CARACTÉRISATION DÉDIÉE

Afin d'offrir des outils pour évaluer les risques pour la santé des nanoparticules, le LNE développe des méthodes de référence pour la mesure de la taille et de la concentration particulaire en phase aérosol.

Depuis une vingtaine d'années, les avancées technologiques ont mis en évidence le potentiel des nanomatériaux dans de nombreux domaines. Pour autant, la production d'une très grande quantité de nano-objets, du fait de leur petite taille, associée à leur très forte réactivité chimique, pose la question de leur risque pour la santé et l'environnement. D'où un important besoin réglementaire, pour lequel le développement de méthodes de références harmonisées et validées pour la caractérisation physico-chimique des nanomatériaux est nécessaire, en particulier lorsqu'ils se présentent sous forme d'aérosols.

Ainsi, l'année passée, les métrologues français ont poursuivi leurs travaux de mise au point de méthodes de référence pour les mesures de distribution en tailles des nano-objets en phase aérosol. Les spécialistes ont notamment développé des protocoles de génération d'aérosols par une méthode dite d'électro-nébulisation. Avantage : contrairement aux méthodes mécaniques classiques, elle limite drastiquement la production d'impuretés qui compliquent la caractérisation ultérieure du diamètre des nanoparticules. «*Nous avons validé le protocole de mesure associé à cette technique de génération d'aérosols, l'ensemble offrant un système de référence présentant un très bon rapport signal sur bruit*», précise François Gaie-Levrel, responsable du projet.

En parallèle, les chercheurs du LNE ont participé à une comparaison inter-laboratoires pour la caractérisation en taille de nanoparticules, menée dans le cadre du club nanoMétrologie.

«*Nous avons travaillé à partir d'une méthode de génération mécanique d'aérosols commune aux différents laboratoires impliqués dans cette comparaison*, explique le chercheur. *Et sommes parvenus à une très bonne cohérence d'ensemble*

*pour les mesures de distributions granulométriques de nanoparticules de dioxyde de silice notamment.*» A la clé, un protocole d'évaluation commun et un guide de bonne pratique pour ces mesures traçables au Système International.

Enfin, le LNE a démarré une collaboration avec des toxicologues. Objectif : évaluer les risques neurotoxiques associés à l'inhalation d'un pesticide modèle nano-

additivé en particules de dioxyde de titane. «*Le  $TiO_2$  est utilisé pour ses propriétés spécifiques telles que bactéricide, antifongique ou encore photocatalytique*, détaille François Gaie-Levrel. *Pour autant, il s'agit de s'assurer que ces avantages ne s'accompagnent pas d'autres effets néfastes pour la santé.*»

Ainsi, dans le cadre d'une thèse de doctorat, les chercheurs ont développé un banc d'exposition in vivo. Il permet de produire le pesticide modèle nano-additivé sous la forme d'un aérosol caractérisé métrologiquement en termes de distribution granulométrique, de morphologie et de concentration totale en masse et en nombre. A la suite de quoi, l'installation a été transmise aux partenaires pour la phase d'essais toxicologiques, actuellement en cours. De quoi faire le lien entre paramètres physico-chimiques des nanomatériaux et leur risque pour la santé. ■

«*Le  $TiO_2$  est utilisé pour ses propriétés spécifiques telles que bactéricide, antifongique ou encore photocatalytique.*»

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



MESURE DE DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DE NANOPARTICULES PAR ANALYSE DIFFÉRENTIELLE DE MOBILITÉ ÉLECTRIQUE COUPLÉE À UN ÉLECTROSPRAY.

## UN RÉSEAU EUROPÉEN EN MÉTROLOGIE POUR LE CLIMAT ET L'OCÉAN

Dans le contexte du réchauffement climatique, il est essentiel de disposer d'une métrologie fiable des grandeurs permettant de suivre l'évolution des modifications climatiques. Le climat est, de plus, une des priorités européennes. Ainsi, en 2018, EURAMET a créé un réseau européen en métrologie (EMN – European Metrology Network) Climat et Océans.

Objectif : organiser et coordonner les activités de la communauté métrologique européenne, en interaction avec les différentes parties prenantes (communautés scientifiques, organismes réglementaires...), sur les thématiques concernées.

Précisément, trois volets composent cet EMN piloté par le NPL (Royaume-Uni) : variables atmosphériques, terrestres et océaniques (dont le LNE a la charge). «*Nous allons commencer par réaliser un état des lieux des besoins de nos parties prenantes et des compétences au sein des Laboratoires de métrologie, à la suite de quoi nous établirons un programme de recherche visant à terme à établir des étalons de référence, ainsi que des guides de bonnes pratiques de mesure et des supports de formation pour les utilisateurs*», explique Paola Fisicaro, responsable du projet pour le LNE.

Le laboratoire français concentre ses efforts sur les paramètres associés à l'acidification de l'océan. Les années passées, un important travail a ainsi été réalisé afin d'établir des références métrologiques pour la mesure du pH des eaux marines. «*En parallèle, nous allons bientôt lancer un programme semblable pour la mesure de l'alcalinité totale*», ajoute la chimiste. De quoi apporter, à terme, une réponse globale à un défi lui-même global ! ■



SOLUTIONS DE RÉFÉRENCE POUR LA MESURE DU PH DE L'EAU DE MER CARACTÉRISÉES PAR LE LNE À L'AIDE DE LA CELLULE PRIMAIRE (CELLULE D'HARNED).

## METRODECOM II : DES ÉTALONS POUR LE DÉMANTÈLEMENT NUCLÉAIRE

Le démantèlement d'une installation nucléaire nécessite un inventaire préalable de sa radioactivité. Pour ce faire, le CEA a développé la caméra gamma GAMPIX, capable d'établir une cartographie des «points chauds» d'un site. Dans le cadre du projet MetroDecom II, les spécialistes du LNE-LNHB l'ont rendue opérationnelle grâce à des solutions d'étalonnage originales.

Pour ce faire, le principe est simple : il s'agit de confronter la réponse de la caméra à des sources radioactives dont les activités sont connues. En pratique les métrologues ont néanmoins dû composer avec un double objectif de GAMPIX : d'une part déterminer correctement les niveaux de radioactivité, d'autre part distinguer les nombreux radionucléides potentiellement présents sur un site nucléaire à démanteler. Comme l'explique Valérie Lourenço, responsable du projet, «*habituellement, nous fournissons des sources de rayonne-*

*ments ne contenant qu'un seul radionucléide. Celles-ci sont obtenues par dépôt d'une goutte liquide que l'on assèche avant mesure entre deux couches solides.*» A l'inverse, les métrologues ont ici dû développer des sources composées jusqu'à 192 gouttes de différents radio-isotopes, l'ensemble devant composer un «matériau» homogène. Difficulté supplémentaire : pour les besoins d'un étalonnage au plus près des réalités de terrain, le choix a été fait d'un substrat souple et déformable, s'adaptant à différentes géométries.

Grâce aux étalons proposés par le LNE-LNHB, une campagne d'étalonnage et de tests a démontré la capacité de GAMPIX à discriminer plusieurs radionucléides en fonction de leur spectre d'émission. De quoi permettre à terme une utilisation optimale par des partenaires industriels lors d'opérations de démantèlement. ■

## LE PROJET EURA-THERMAL ACCROÎT LA ROBUSTESSE DES MESURES THERMIQUES EN EUROPE

Le développement de l'industrie en Europe centrale et en Irlande nécessite des besoins accrus en précision et traçabilité des mesures thermiques (température et propriétés thermiques). Pour y répondre, le projet Eura-Thermal, piloté par le LNE et regroupant 11 partenaires, s'est donné pour objectif d'augmenter les compétences des laboratoires nationaux de métrologie des pays concernés.

Ainsi, Eura-Thermal a notamment permis d'améliorer les références de température à partir desquelles les différents laboratoires demandeurs réalisent mesures et étalonnages. Outre son rôle de coordination de l'ensemble du projet, le laboratoire a par ailleurs directement pris en charge le volet «conductivité thermique» du projet, impliquant les laboratoires nationaux de métrologie serbe, hongrois et tchèque. Comme le précise Bruno Hay, responsable du programme, «ce volet intéresse typiquement l'industrie du bâtiment de ces pays pour la caractérisation et le contrôle des propriétés thermiques des matériaux isolants.»

Précisément, le laboratoire français a ainsi réalisé un audit des moyens de mesure mises en œuvre dans les laboratoires partenaires et accueilli des chercheurs étrangers afin de les familiariser avec ses méthodes. A la suite de quoi, le LNE a supervisé une campagne de comparaisons entre laboratoires de mesures de conductivité thermique réalisées sur les mêmes matériaux.

De quoi renforcer *in fine* la robustesse des chaînes métrologiques des différents pays impliqués dans Eura-Thermal dans tous les segments des mesures thermiques. ■



## MÉTROLOGIE DE L'HYDROGÈNE : UN BANC DE MESURE POUR MAXIMISER LA CHARGE DES HYDRURES

Transport, gestion de l'intermittence des énergies renouvelables... l'usage de l'hydrogène comme vecteur énergétique est en plein essor. Son déploiement à grande échelle nécessite néanmoins le développement d'importants moyens métrologiques.

Afin de dresser un état des lieux des besoins normatifs, Frédérique Haloua, au LNE, coordonne depuis 2016 un projet "Hydrogène" dans le cadre du programme européen EMPIR. Dans ce cadre, l'année passée, le laboratoire a conduit une étude préliminaire visant à définir son offre en matière de métrologie de l'hydrogène.

Résultat : «A la suite de discussions avec nos partenaires industriels, nous avons identifié le besoin de développer des outils pour l'optimisation du stockage de l'hydrogène

*sous forme d'hydrures»,* explique la spécialiste des gaz. Ces composés solides formés par association d'hydrogène et d'un alliage métallique sont une alternative intéressante au stockage sous pression. Encore faudrait-il pouvoir préciser les conditions de température, de pression et de débit dans lesquelles former ces composés afin de maximiser leur capacité de stockage.

Pour ce faire, une possibilité est de suivre l'évolution de la conductivité thermique du mélange au cours de la charge en hydrogène, dont la valeur est une indication de la quantité de gaz adsorbé. D'où la décision des scientifiques du LNE-LCM, au terme de leur étude, de développer un banc de mesure dédié à cette tâche. De quoi proposer à terme des références pour le stockage de l'hydrogène solide. ■



## UN ÉTALON DE COURANT HAUTE FRÉQUENCE FIABLE À DES INTENSITÉS DE 10 AMPÈRES

**Des chercheurs du LNE ont mis au point un nouvel étalon et une méthode de caractérisation novatrice pour l'étalonnage de capteurs de courants de forte intensité et à des fréquences élevées.**

De nombreuses industries réalisent des mesures de courant à hautes fréquences, typiquement jusqu'à 1 MHz, et présentant des intensités jusqu'à 10 A. C'est notamment le cas de l'industrie automobile pour la caractérisation du rendement de moteurs électriques. Pour autant, jusqu'alors, il n'existait pas de possibilité d'étalonner de manière fiable les capteurs utilisés. Précisément, les étalons disponibles permettaient de mesurer des courants inférieurs ou égaux à 1 A, à des fréquences jusqu'à 1 MHz, mais limitées à 100 kHz pour les courants entre 1 A et 100 A. D'où le travail réalisé par Mohamed Ouameur, dans le cadre de sa thèse de doctorat conduite au LNE.

Concrètement, il existe plusieurs types de capteurs et d'étalons de courant. Mais seuls les « shunts » permettent des mesures en courant continu et alternatif à basses fréquences. Leur principe : on déduit les caractéristiques d'un courant électrique à partir de la mesure d'une tension – opération très bien contrôlée – et de la connaissance de l'impédance du dispositif. Plusieurs laboratoires de métrologie ont développé de tels étalons de courant. Mais d'une part il n'existe pas de méthode de mesure permettant de les caractériser à des fréquences élevées. D'autre part, comme l'explique Mohamed Ouameur, «ces dispositifs, soit parce qu'ils sont sensibles aux perturbations extérieures, soit parce qu'ils sont composés d'éléments dont on ne maîtrise pas les caractéristiques, ne permettent pas qu'on en produise un modèle permettant de les caractériser analytiquement.» Résultat : l'impossibilité d'établir une comparaison entre mesures et prédictions théoriques, d'où les limitations constatées.

Pour les dépasser, les chercheurs du laboratoire ont donc commencé par développer un nouveau type de shunt fondé sur un disque résistif de nickel et de chrome déposé sur un substrat isolant. L'intérêt ? Leur géométrie coaxiale les rend très peu sensible à l'inductance électrique de la ligne coaxiale dans laquelle on les insère, ce qui a permis aux scientifiques d'en dériver un modèle analytique robuste.

En parallèle, ces derniers ont développé une nouvelle méthode pour la caractérisation de ce type de dispositifs. Mettant en œuvre un analyseur de réseau vectoriel, instrument pour lequel une méthode d'étalonnage « maison » a été développée et qui permet des mesures avec de meilleures exactitudes entre 0 et 10 MHz.

Résultat : la variation de l'impédance de l'étalon avec la fréquence du courant qui le traverse est inférieure d'un facteur 10 à celle des autres étalons. Or la précision d'un étalonnage dépend directement de ce facteur. Par ailleurs, les mesures se sont révélées être en très bonne adéquation avec les prédictions du modèle, ce qui permettra de s'abstraire analytiquement d'une partie des incertitudes liées à l'étalon.

Mieux, les résultats obtenus sont au-delà des objectifs fixés. «Nous n'avons pas encore concrètement réalisé d'étalonnage avec notre nouveau dispositif, explique le physicien. Mais nous espérons atteindre mieux que les 0,2 % d'incertitude visé.» En comparaison, les meilleurs dispositifs d'étalonnage aujourd'hui disponibles ne permettent pas de dépasser 2 % dans la gamme de courant considérée. ■

« Nous espérons atteindre mieux que les 0,2 % d'incertitude visé. »

Mohamed Ouameur, département Basse Fréquence du Pôle Métrologie électrique.



## INDUSTRIE DU FUTUR : ACCOMPAGNER L'INNOVATION



## RÉFÉRENCES TEMPS-FRÉQUENCE : LA PRÉCISION DE LA FIBRE ACCESSIBLE À TOUS

**Le premier lien fibré cohérent piloté par un industriel pour la dissémination du temps atomique démontre la maturité de la technologie que le LNE-SYRTE a grandement participé à faire émerger.**

Pour la première fois en 2018, un industriel – Muquans – a équipé et exploité un lien fibré cohérent pour la délivrance de références de temps et de fréquences entre Paris et Lille. Plus que symbolique, la prouesse illustre le bien-fondé de la stratégie de l'Equipex REFIMEVE. Depuis 2011, il associe des laboratoires académiques utilisateurs, le Laboratoire de physique des lasers, le LNE-SYRTE, le réseau RENATER et un consortium d'industriels dans le but de faire de la fibre le canal de référence pour la dissémination du temps atomique. De fait, aujourd'hui, les références de temps sont échangées par satellite. Or, au mieux, cela permet d'atteindre une précision relative de  $10^{-15}$  sur la seconde, soit un niveau d'incertitude à peine compatible avec la précision des meilleures horloges micro-ondes. Et ce sera totalement insuffisant lorsque, comme cela est imaginé à moyen terme, l'unité de temps sera redéfinie à partir d'horloges atomiques dites optiques, précises à  $10^{-18}$  ! Pour faire face à l'enjeu, la fibre optique est la solution : «une propagation guidée, peu de perte et moins de bruit ; c'est le canal idéal pour échanger des références de temps-fréquence», résume Paul-Eric Pottie, du LNE-SYRTE. D'où le projet REFIMEVE, visant à développer, puis industrialiser, l'instrumentation nécessaire (amplificateurs, répéteurs...) à la distribution des références de fréquence sur un réseau fibré existant. Résultat : le temps atomique est aujourd'hui délivré via RENATER, le Réseau national pour la technologie, l'enseignement et la recherche, à plusieurs laboratoires de recherche fondamentale. Par exemple, au Laboratoire de physique

« Ce projet illustre la réussite du transfert à l'industrie des technologies de dissémination du temps atomique par fibre. »  
Paul-Eric Pottie, ingénieur de recherche au LNE-SYRTE.

des lasers, à Villetaneuse, pour des tests fondamentaux sur la violation de parité, une symétrie fondamentale, recherchée dans les molécules. Par ailleurs, des travaux avec des partenaires européens ont permis des comparaisons d'horloges par réseau fibré à un niveau de précision jamais atteint, notamment entre le laboratoire français de métrologie et ses homologues allemand, la PTB, et anglais, le NPL. Ainsi, l'étape franchie par Muquans l'été dernier est l'aboutissement logique de la démarche. «Elle illustre la réussite du transfert à l'industrie des technologies de dissémination du temps atomique

par fibre, qui vont ainsi commencer à diffuser au-delà de REFIMEVE», se félicite le physicien. Dans ce but, le LNE-SYRTE coordonne depuis un peu plus d'un an le projet européen CLONETS, impliquant 19 partenaires jusqu'à 2019. Objectif : étendre à l'Europe et au-delà de la sphère académique la logique de REFIMEVE. «Après le succès de REFIMEVE, l'idée est de créer des synergies entre métrologues, industriels et exploitants de réseaux fibrés au niveau du continent», précise Paul-Eric Pottie. A la clé : la possibilité de diffuser le plus largement possible l'unité de temps à la précision maximale à tous les utilisateurs potentiels. «Les attentes sont multiples : comparaisons entre horloges optiques en vue de la redéfinition de la seconde, tests de la relativité générale ou encore géodésie...», énumère le métrologue. Le lien fibré cohérent établi entre Paris et Lille n'est que le début ! ■

## LES FAIBLES PRESSIONS MESURÉES «À LA LOUPE»

Electronique, pharmaceutique, nucléaire... de nombreuses industries requièrent des environnements sous atmosphère contrôlée. D'où le projet européen «pres2vac» visant à améliorer l'exactitude et la traçabilité des mesures de pression dans une gamme comprise entre 1 pascal et 10 000 pascals (la pression atmosphérique est de l'ordre de 1 000 hectopascals), auquel les chercheurs du LNE-LCM ont apporté leur concours. Pour les pressions supérieures, les métrologues disposent de moyens de mesure directement raccordés aux unités du système international. Ainsi, les spécialistes du laboratoire réalisent des mesures de pression en équilibrant la force exercée par un gaz sur un ensemble piston-cylindre avec des masses. «*Mais pour les «faibles» pressions, les forces en jeu sont trop faibles, d'où le recours à une «cellule de pesée»*», explique Pierre Otal, responsable du projet pour le LNE-LCM.

Mais en raison des difficultés pour stabiliser la pression, les incertitudes relatives sont dégradées. Pour les réduire au maximum, les scientifiques français ont ainsi mené une étude analytique et expérimentale visant à mieux contrôler les sources d'incertitude de leur dispositif. En parallèle, ils ont réalisé un banc d'essai jouant le rôle d'étalon de transfert, permettant des comparaisons entre laboratoires avec les différents moyens de mesure équivalents mis en œuvre par l'ensemble des laboratoires partenaires à travers l'Europe. Enfin, ils ont également participé à une campagne de comparaison inter-laboratoires impliquant un autre type d'étalon fondé sur des mesures dites en dépression. A la clé, une amélioration de près d'un facteur 10 des incertitudes au niveau des références nationales qui, par voie de conséquence, fiabilise l'ensemble de la chaîne métrologique ! ■

## IMPRESSION 3D : LA PRÉCISION MÉTROLOGIQUE EN LIGNE DE MIRE

Les méthodes de fabrication additive, ou impressions 3D, constituent une véritable révolution. Permettant la mise en forme d'une pièce par ajout de matière couche par couche, elles offrent en effet la possibilité de réalisations d'une grande complexité, avec des applications en aéronautique et en médecine notamment.

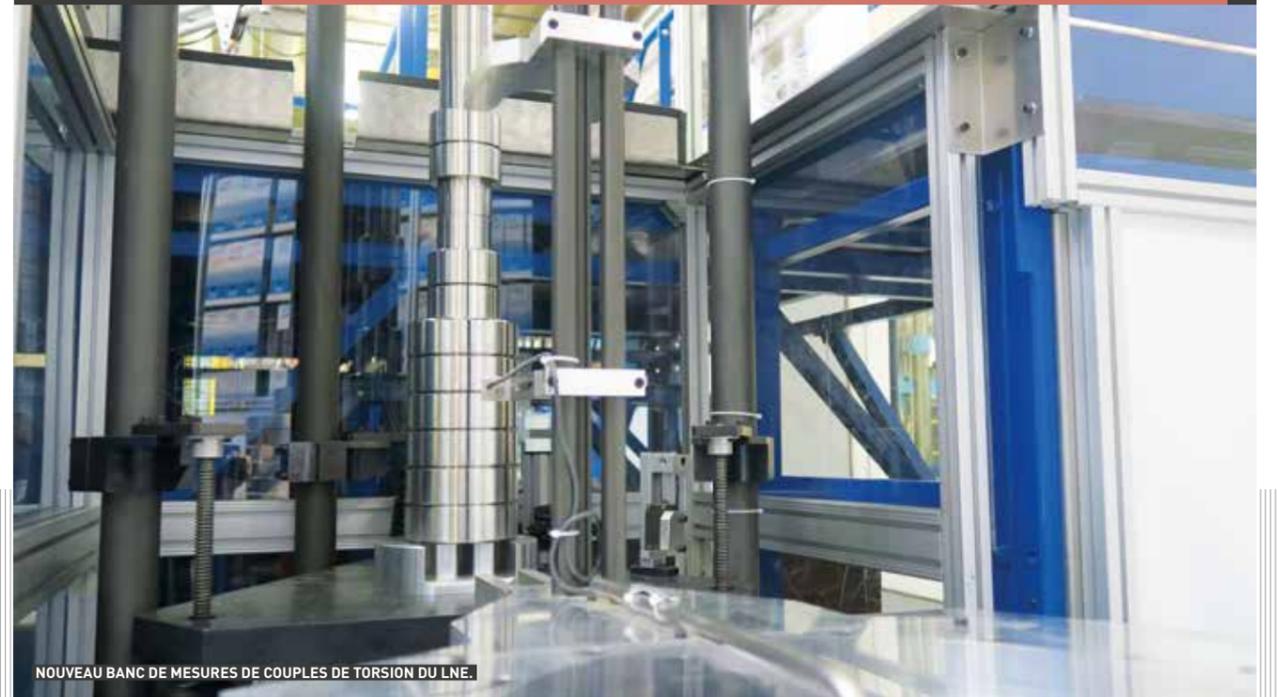
Pour en tirer tout le profit, les industriels doivent néanmoins encore apprendre à en maîtriser toutes les subtilités. En particulier, en ce qui concerne les méthodes de contrôle non destructif associées, qui permettent de vérifier la conformité d'une pièce par rapport à son modèle numérique.

Dans ce but, le LNE-LCM participe à un groupe de normalisation ISO, visant à édicter les bonnes pratiques en la matière. Dans ce cadre, Anne-Françoise Obaton a été détachée au NIST (*National Institute of Standards and Technology*), à Gaithersburg aux USA, pendant toute l'année 2018. En collaboration avec les chercheurs des États-Unis, elle a en particulier réalisé des pièces par synthèse additive contenant différents types de défauts (défaut de couche, porosité et manque de fusion). Objectif : tester la pertinence de différentes techniques d'analyse : tomographie par rayon X, résonance acoustique, méthodes ultrasonores... dans la mise en évidence de ces malfaçons ici intentionnelles.

Comme le résume la scientifique : «*Les résultats de ces études, ainsi que d'autres, réalisées par les différents membres du groupe, constitueront les données d'entrée pour un guide de normalisation à paraître.*» A terme, les travaux des scientifiques du LNE-LCM visent par ailleurs à rattacher l'ensemble des méthodes de contrôle non destructif pour la fabrication additive à une chaîne métrologique traçable au SI. ■



ANALYSE PAR TOMOGRAPHIE À RAYONS X D'UN IMPLANT DENTAIRE  
RÉALISÉ PAR FABRICATION ADDITIVE PAR LA SOCIÉTÉ Z3DLAB.



NOUVEAU BANC DE MESURES DE COUPLES DE TORSION DU LNE.

## MESURES DE COUPLES DE TORSION : LE NOUVEAU BANC COMPLET ET OPÉRATIONNEL

Le vaste chantier de renouvellement des installations de référence du LNE dédiées à la mesure de couples de torsion, pour l'étalonnage des couplemètres utilisés dans l'industrie, s'est finalisé en 2018. Le laboratoire a en effet terminé l'extension à 500 newtons mètres (N.m) des capacités de son second banc. «*Après une phase de rodage, une comparaison internationale est prévue cette année avant mise en service définitive*», précise Philippe Averlant, responsable du Dépar-

tement Force et grandeurs associées. Ainsi, le laboratoire français couvre désormais toute la gamme comprise entre 0,1 N.m et 5 000 N.m, importante pour les activités de serrage et les mesures de puissance dans l'industrie automobile. Avec des incertitudes de mesure réduites d'un facteur 4 par rapport à celles des installations antérieures, le LNE s'affiche à nouveau parmi les leaders mondiaux du domaine. ■

## LIFE FARBIOTY : DU LIN POUR LA CONSTRUCTION FERROVIAIRE

Dans la construction ferroviaire, des composites incorporant de la fibre de verre sont utilisés aussi bien pour des cloisons que des pièces structurales, jusqu'au nez du TGV. Dans le cadre du projet Life Farbioty, le LNE et cinq partenaires industriels étudient la possibilité de remplacer ce matériau de synthèse par de la fibre de lin à l'impact environnemental beaucoup plus faible.

Comme l'explique Pascal Launay, responsable du projet pour le LNE, «*le lin est non seulement un matériau durable, mais, de plus, à moindre poids, il présente des propriétés mécaniques comparables à celles de la fibre de verre.*» A condition de trouver la bonne formulation.

Ainsi, dans une première phase du projet, actuellement en cours de finalisation, les spécialistes étudient les perfor-

mances de 16 échantillons se distinguant par les traitements subis par les fibres qu'ils contiennent et la matrice dans laquelle celles-ci sont incorporées. «*Nous étudions d'une part la résistance au feu des échantillons, cruciale, et réalisons des tests mécaniques dont les résultats serviront en particulier lors de la modélisation d'une pièce complète*», précise le scientifique.

A la suite, quatre formulations seront retenues pour des tests de résistance aux UV, à la température et à l'humidité, de même que sur des essais de fatigue. Tests aux termes desquels les industriels partenaires réaliseront une pièce de démonstration pour un capot de balise. Avant peut-être de voir le lin s'affirmer comme un matériau de choix pour la construction ferroviaire ! ■



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

## DES INTELLIGENCES ARTIFICIELLES POUR DÉSHERBER

Que le meilleur gagne ! Cette année a débuté le Challenge ROSE, organisé par le LNE, Irstea, l'Agence française pour la biodiversité (AFB) et l'Agence nationale de la recherche (ANR). Objectif : évaluer les performances des solutions automatisées de désherbage proposées par quatre consortiums, dans le but de réduire l'utilisation de produits phytopharmaceutiques.

Dans ce cadre, outre son rôle de coordination, le LNE apporte son expertise en matière de développement de référentiels communs pour l'évaluation des systèmes d'intelligence artificielle (IA). «C'est la première fois qu'un challenge IA a lieu dans le domaine agricole, dans un environnement de tests impliquant des cultures, donc le vivant, explique Virginie Barbosa, chef de projets au LNE. L'enjeu méthodologique

consiste donc pour nous dans la mise au point d'un protocole d'évaluation contrôlé et reproductible.» Et la scientifique d'ajouter : «L'intérêt d'un «challenge» vise moins à déterminer un vainqueur qu'à créer une émulation collective via une comparaison objective dans un environnement commun.»

Ainsi, les premiers mois de 2018 ont été consacrés à l'établissement du plan d'évaluation. A la suite de quoi, en juin, les équipes et les organisateurs se sont retrouvés pour lancer la campagne d'évaluation «à blanc» ou «dry-run». Puis, en mai prochain, les quatre robots devront à nouveau faire leurs preuves sur les parcelles agricoles contrôlées. Ils seront alors fin prêts pour les campagnes « officielles », dont la première débutera en octobre de cette année. Résultat des courses en 2021 ! ■

## EN ROUTE VERS UNE MÉTROLOGIE POUR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Comment évaluer les performances ou le bon fonctionnement d'un système d'intelligence artificielle ? Deux projets en cours, auxquels participe le LNE, visent à définir des standards permettant de se rapprocher d'une métrologie de l'IA, comme souhaité par Cédric Villani dans son rapport qui mène à faire du LNE l'autorité compétente en matière de métrologie de l'IA.

Ainsi, Voxcrim, en collaboration avec les centres techniques et scientifiques de la police et de la gendarmerie, vise à déterminer des critères pour l'évaluation de systèmes de comparaison de voix appliqués à la criminalistique. Leur but : confondre un suspect en comparant sa voix enregistrée à son insu, par exemple lors d'une écoute téléphonique, puis lors d'un interrogatoire. «Il s'agit de définir les conditions de mise en œuvre de cette comparaison, telles que les conditions d'enregistrement optimales permettant de garantir la fiabilité du processus et d'estimer si le résultat peut être recevable par un tribunal»,

explique Agnès Delaborde, au LNE. Objectif à terme : définir un référentiel d'accréditation pour les centres réalisant ces comparaisons de voix.

De son côté, ALLIES a pour ambition d'offrir des référentiels permettant d'évaluer la fiabilité dans le temps de systèmes auto-apprenants de traduction ou d'identification de locuteurs. Certaines métriques permettront ainsi à ces systèmes intelligents de mesurer leur propre progression. D'autres de comparer les différents algorithmes d'apprentissage automatique existants et de déterminer les approches les plus prometteuses. «En 2018, nous avons adapté pour ALLIES la plateforme BEAT de notre partenaire suisse IDIAP, permettant notamment une évaluation en ligne des systèmes de traitement de l'information», ajoute Guillaume Avrin, au LNE. Elle est ainsi prête pour la campagne d'évaluation ouverte prévue dès cette année ! ■

## HYGROMÉTRIE : L'ÉTALONNAGE À HAUTE TEMPÉRATURE ET EN DYNAMIQUE DÉSORMAIS OPÉRATIONNEL AU LNE-CETIAT

Dans le cadre du projet européen HIT, le laboratoire français a étendu la gamme de fonctionnement en température de ses moyens d'étalonnage d'hygromètres et les a adaptés à des conditions variables d'humidité.

Niveaux d'humidité très importants ou variables dans le temps, température de travail élevée... La grande diversité des situations de mesure de l'humidité en milieu industriel peut rendre cette opération particulièrement délicate. Elle confronte les métrologues à des problèmes de capteurs, de définition des grandeurs de référence ou encore d'étalonnage des hygromètres. Pour y remédier, 15 partenaires européens, dont le LNE-CETIAT, se sont associés dans le cadre du projet HIT, visant à maintenir et à développer les références métrologiques en hygrométrie. Dans ce but, les spécialistes ont en particulier proposé de résoudre la question de l'extension de la traçabilité des mesures de l'humidité relative au-dessus de 100 °C.

En effet, une méthode primaire répandue pour l'étalonnage des hygromètres dits à variation d'impédance, fait référence d'une part à la température de rosée d'un air humide, c'est-à-dire celle à laquelle apparaissent les premières gouttes d'eau liquide, et d'autre part à la pression de saturation de l'eau. Pour l'étendre à des températures où l'eau se trouve à l'état de vapeur, les membres du consortium ont ainsi proposé une définition rigoureuse de la notion d'humidité relative au-delà de 100 °C, en même temps qu'ils ont conduit des travaux de caractérisation supplémentaires de leurs moyens de mesure. Par ailleurs, les partenaires du projet ont réalisé une campagne de comparaison inter-laboratoires de leurs moyens de mesures. A la clé : la possibilité pour le laboratoire de proposer une

méthode d'étalonnage validée jusqu'à 140 °C.

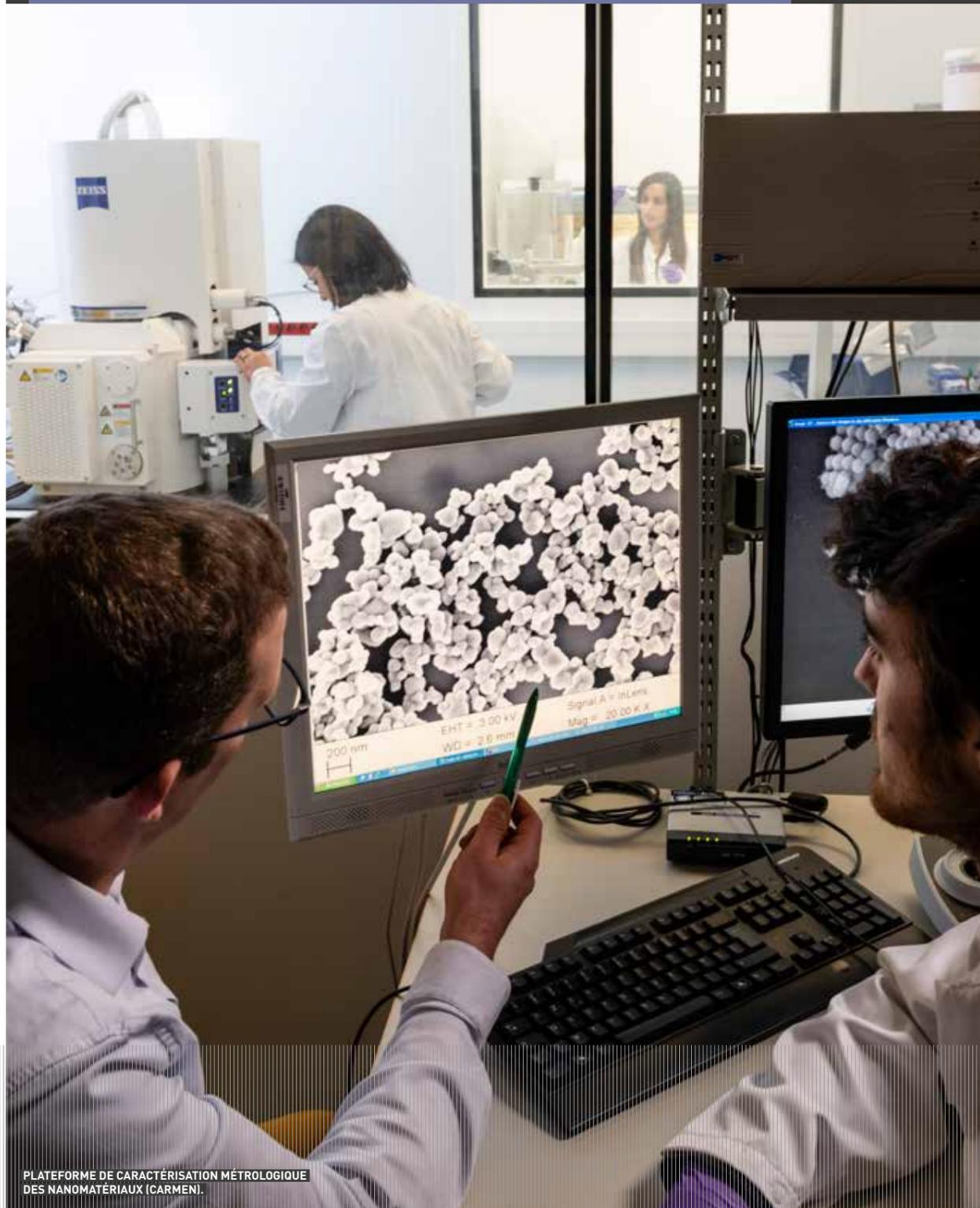
Les scientifiques ont réalisé un important travail d'élaboration de solutions d'étalonnage dynamique. De fait, comme l'explique Eric Georgan, responsable du projet HIT pour le LNE-CETIAT, «usuellement, on étalonne les hygromètres à un niveau d'humidité constant. Or, dans la pratique, ces instruments sont souvent confrontés à des environnements où l'humidité varie brutalement, ce qui pose la question de la pertinence de l'étalonnage en "statique".»

« Les hygromètres sont souvent confrontés à des environnements où l'humidité varie brutalement, ce qui pose la question de la pertinence de l'étalonnage en "statique". »

Eric Georgan, responsable du projet HIT pour le LNE-CETIAT.

Concrètement, les spécialistes ont ainsi proposé un dispositif permettant d'engendrer des échelons d'humidité au sein de leur enceinte d'étalonnage. «De cette manière, il est possible d'accéder aux temps de réponse d'un hygromètre et donc d'évaluer ses performances pour des régimes de fonctionnement variables dans le temps», explique le scientifique.

Mieux, en collaboration avec leurs collègues de la PTB (Allemagne), les métrologues du LNE-CETIAT ont équipé leur chambre d'essai au moyen d'un système de mesure d'humidité par des méthodes spectroscopiques. Réagissant quasi instantanément à une variation d'humidité, il permet de garantir la forme des échelons appliqués dans l'enceinte et, ce faisant, d'accroître la robustesse des procédures d'étalonnage dynamique proposées. En phase avec les besoins industriels actuels ! ■



PLATEFORME DE CARACTÉRISATION MÉTROLOGIQUE  
DES NANOMATÉRIAUX (CARMEN).

## MATÉRIAUX DE DEMAIN : MAÎTRISER LES ENJEUX

## INCINÉRATION DES DÉCHETS : LA TOXICITÉ DES NANOPARTICULES EN QUESTION

L'incinération des déchets modifie les propriétés des nanoparticules qu'ils contiennent. Avec des effets sur la toxicité de ces dernières, tel que l'a révélé le projet Nanotox'In.

Résistance mécanique, effet barrière, résistance au feu... incorporées dans de nombreux matériaux, notamment les plastiques, les nanoparticules en modifient avantageusement les propriétés. Et leur usage est en plein essor. Pour autant, la question de leur toxicité est posée, notamment dans le contexte de l'incinération des déchets qui en contiennent, pour lesquels il n'existe aucune filière de recyclage spécifique, et pas même un marquage spécifique. D'où le projet Nanotox'In, auquel a participé le LNE, visant à évaluer la toxicité de nanoparticules avant et après incinération.

«Depuis une dizaine d'années, la question de la toxicité des nanomatériaux fait l'objet d'une attention soutenue, explique Simon Delcour, responsable du projet pour le LNE. Pour autant, elle est essentiellement adressée lors de l'étape d'élaboration d'un matériau.»

Or, lors de l'incinération d'un matériau, les nanoparticules qu'il contient sont susceptibles de voir leur propriétés physiques et chimiques modifiées, de même que, par voie de conséquence, leur toxicité.

Dans le cadre Nanotox'In, les scientifiques ont concentré leurs efforts sur un plastique chargé en nanoparticules d'alumine, de boehmite et de silice. «La formulation que nous avons définie est typique de celle des matériaux utilisés pour le gainage des câbles électriques, explique l'ingénieur. Ils sont produits en très fort tonnage et, non recyclés, finissent dans les filières classiques d'incinération.» Ainsi, grâce à la plateforme CARMEN, du LNE, les scientifiques ont commencé par

caractériser en détails les propriétés de leurs nanoparticules, avant et après incinération du plastique qui les contenait.

«Avec CARMEN, il est possible de caractériser métrologiquement sept propriétés des nanoparticules : taille, forme, état d'agglomération, structure cristalline, charge, niveau d'impureté, surface spécifique et solubilité», précise Simon Delcour. A la suite de quoi, les scientifiques de l'Ecole des Mines de

Saint-Etienne, partenaires du projet, ont évalué l'évolution de leur toxicité sur des cellules *in vitro*, en distinguant le cas des nanoparticules contenues dans les suies et les résidus solides. Objectif : parvenir à établir une corrélation fine entre les propriétés physico-chimiques des nanoparticules et leur toxicité.

Résultat : la toxicité des nanoparticules

est modifiée de façon non triviale par l'incinération. Précisément, dans le résidu solide, elle est maintenue au même niveau que dans l'état initial. En revanche, dans les suies, elle est soit maintenue, soit augmentée selon le type de nanoparticules et les transformations qu'elles ont subies.

Dans le but de se rapprocher de situations réalistes, les scientifiques ont démarré une nouvelle étude visant à étudier la variation de toxicité des nanoparticules, avant et après incinération, non pas prises séparément, mais associées les unes aux autres. Quoi qu'il en soit, il apparaît que la problématique de toxicité des nanoparticules doit désormais être adressée sur la totalité du cycle de vie d'un matériau. ■

« Avec CARMEN, il est possible de caractériser métrologiquement sept propriétés des nanoparticules. »

Simon Delcour, responsable du projet Nanotox'In pour le LNE.



BANC DE DÉGRADATION THERMIQUE  
DES NANOCOMPOSITES.

## ALIMENTATION : UN MATÉRIAU «BARRIÈRE» RECYCLABLE

La conservation des aliments nécessite des emballages présentant un fort effet «barrière» contre les gaz environnants, notamment l'oxygène, source d'oxydation. Pour ce faire, des solutions impliquant des matériaux multicouches existent. Mais ces derniers, du fait de leur structure complexe, posent des problèmes de recyclage. Dans le cadre du projet NanoCoat, les chercheurs du LNE<sup>(1)</sup> ont ainsi proposé une solution monocouche présentant de plus un effet barrière record.

Précisément, ce matériau se présente sous la forme d'un substrat de PET (Polyéthylène Téréphtalate) de 12 micromètres recouvert d'une enduction, dont l'une à base de gélatine de poisson, nano-chargée avec une argile lamellaire de type vermiculite. Comme l'explique Catherine Loriot, responsable du projet, «incorporés à l'enduction, les nano-feuillets d'argile composent un réseau entre les mailles

duquel le gaz diffuse lentement, d'où il résulte un important effet barrière.» En effet, les chimistes ont montré que la perméabilité à l'hélium était 100 à 1 000 fois supérieure à celle d'un matériau barrière classique tel que le PVCD (Polychlorure de Vinylidène). De même, la perméabilité à l'oxygène est augmentée d'un facteur 350 par rapport au cas d'un PET non enduit, même si la sensibilité de ce matériau à l'humidité reste à améliorer.

À la suite de ces résultats prometteurs, les spécialistes envisagent de poursuivre leurs travaux dans deux directions. D'une part rapprocher leur procédé de synthèse des standards industriels, d'autre part analyser en détails les propriétés mécaniques de leur matériau, et sa tenue au vieillissement. ■

<sup>(1)</sup> Projet financé par l'Actia et emmené en partenariat avec le Cnam (laboratoire PIMM), le CTCPA, l'Université de Bourgogne (laboratoire PAM) et l'IPC de Clermont-Ferrand.



## LE RAYONNEMENT SYNCHROTRON POUR LA MÉTROLOGIE DES NANOCOUCHE

L'industrie est entrée dans l'ère du nanomètre. Telle l'électronique dont nombre de composants sont désormais constitués d'un empilement de couches nanométriques à la structure complexe. D'où la nécessité de développer une métrologie adaptée à la mesure et au contrôle qualité de ces systèmes. Dans ce but, le LNE-LNHB a participé au programme européen 3DMetChemIT visant à proposer des protocoles de caractérisation de matériaux nanostructurés. De tels protocoles existent mais sont souvent destructeurs. Pour leur part, les scientifiques du laboratoire ont proposé une méthode d'analyse non destructive fondée sur le recours conjoint à deux méthodes utilisant un rayonnement synchrotron. Comme le détaille Yves Ménesguen, responsable du projet pour le LNE-LNHB, «baptisée XRR (X-ray reflectivity), la première de ces méthodes est sensible à l'épaisseur des couches et aux rugosités d'interfaces. La seconde, nommée GIXRF (Grazing incidence X-Ray Fluorescence), renseigne davantage sur la composition de ces couches.»

Ainsi, les physiciens ont montré qu'il est possible de déterminer de manière non destructive les paramètres caractérisant des nanocouches. Par ailleurs, l'établissement d'une chaîne traçable de mesures nécessitera de compléter la détermination de certains paramètres atomiques entrant en ligne de compte pour interpréter les mesures, objectif faisant l'objet d'un projet en cours. Il n'empêche, le potentiel métrologique de la méthode n'est désormais plus à démontrer. ■



CASTOR, UN INSTRUMENT DE MESURE DE DÉPÔTS D'ÉPAISSEURS NANOMÉTRIQUES.

## LA NAISSANCE D'UNE MÉTROLOGIE ÉLECTRIQUE POUR LES CIRCUITS 3D

Actuellement l'industrie a adopté des semi-conducteurs intégrant des technologies nouvelles, entre autres des composants obtenus par empilement 3D de circuits intégrés. Ces derniers nécessitent d'importants développements métrologiques. En particulier pour la caractérisation fine des interconnexions 3D entre les différentes «étages» de circuits. C'était l'enjeu du projet européen 3D Stack, coordonné par le LNE. Dans ce cadre, les métrologues français se sont focalisés sur la caractérisation électrique de ces micro-connexions en cuivre, pour laquelle ils ont étudié l'intérêt de deux techniques de mesure de la résistivité : l'AFM (Atomic Force Microscope) à pointe conductrice et la microscopie à sonde locale micro-ondes (SMM). La première permet d'obtenir une «carte» de la résistivité d'un matériau, la seconde méthode, impliquant

un courant à haute fréquence, donne accès à son impédance complexe.

Comme l'explique Djamel Allal, coordinateur de 3D Stack, «cette première étude n'a pas permis d'obtenir de mesure quantitative. Pour autant, dans un domaine où l'on part d'une page quasi blanche, nous avons ouvert un chemin vers des mesures en principes traçables au Système international d'unités.» Par ailleurs, elle a permis aux chercheurs d'émettre des recommandations, notamment sur la gamme de fréquences électriques pertinentes pour les mesures de SMM.

Au-delà, 3D Stack a permis aux scientifiques du LNE de renforcer leurs compétences sur les deux techniques utilisées, dans un cercle vertueux bénéfique à la métrologie des interconnexions 3D et de la microélectronique en générale. ■



MICROSCOPE À FORCE ATOMIQUE MÉTROLOGIQUE.

## LE NANO-MONDE À LA PRÉCISION DU... NANOMÈTRE

Une méthode originale de caractérisation de la morphologie de nanoparticules offre la possibilité de mesurer leur taille avec une précision inégalée et traçable au Système international d'unités.

Peintures, pneumatiques, électronique, cosmétiques, médicaments... les nanomatériaux sont partout. Depuis 20 ans, d'importants efforts de R&D ont porté sur les procédés de synthèse et d'élaboration. Pour autant, des difficultés subsistent pour caractériser finement les nanoparticules. Or ce manque pèse sur les capacités de l'industrie à reproduire les propriétés des nanomatériaux observées au laboratoire, en même temps qu'il freine leur acceptabilité sociale. Pour y faire face, le LNE-LCM développe d'importants programmes en métrologie des nanoparticules. Il a obtenu en 2018 des résultats remarquables sur la caractérisation de leur morphologie.

Précisément, les métrologues français ont proposé une méthode originale afin de mesurer la taille et d'évaluer la forme de nanoparticules. Leur idée : coupler les deux sondes aux avantages complémentaires que sont la microscopie électronique à balayage et la microscopie à force atomique. Comme l'explique Nicolas Feltin, à l'origine du projet, «*la première permet de réaliser des mesures bidimensionnelles (typiquement longueur et largeur) sur des nanoparticules déposées sur un substrat. La seconde donne accès à la troisième dimension en mesurant leur hauteur.*»

Au-delà du concept, plusieurs développements ont été nécessaires pour que cette méthode hybride puisse être mise en œuvre. Ainsi, les scientifiques ont mis au point un nouveau substrat à base de silicium et une méthode de dépôt compatible avec les deux techniques expérimentales. Par ailleurs, en collaboration avec la société Pollen Metrology, ils ont développé un logiciel dit de co-localisation, permettant

d'assurer qu'une particule indexée sur un cliché de microscopie électronique soit aussi identifiée sans ambiguïté sur un autre obtenu par microscopie à force atomique. Enfin, un algorithme de fusion des données de mesure de l'une et l'autre sonde, de natures différentes, a été créé.

Résultat : les spécialistes du laboratoire sont parvenus à mesurer en «3D» des nanoparticules modèles de silice avec une incertitude comprise entre 2 et 4 nanomètres. Comme le précise Nicolas Feltin, «*à ce jour, notre méthode est la seule qui ait fait l'objet d'un bilan d'incertitude.*»

«*A ce jour, notre méthode est la seule qui ait fait l'objet d'un bilan d'incertitude.*»

Nicolas Feltin, responsable Scientifique de l'institut LNE-NanoTech.

A ce titre, elle est également la seule qui permette d'indiquer si un matériau entre ou pas dans la catégorie «nano» au sens de la réglementation européenne, c'est-à-dire, si au moins 50 % des nanoparticules qui le composent ont une taille inférieure à 100 nanomètres.

Mieux, 2018 a vu la mise en service du microscope à force atomique métrologique. Grâce à ce moyen primaire unique en France, il est ainsi désormais possible de garantir la traçabilité de mesures effectuées sur des nano-objets au Système international d'unités. Pour ce faire, les chercheurs, en collaboration avec le laboratoire C2N du CNRS, ont développé des structures de référence présentant des motifs à l'échelle nano. La taille de ces derniers une fois mesurée sur l'AFM métrologique, il est alors possible d'utiliser ces structures pour l'étalonnage d'autres instruments. De cette manière, les métrologues du LNE-LCM ont en particulier assuré la traçabilité de leur méthode hybride. De quoi mettre résolument le nano-monde en phase avec les exigences de la métrologie. ■

## RETOUR SUR CPEM 2018

Du 9 au 13 juillet 2018 s'est tenue CPEM, la plus importante conférence scientifique et technologique dans le domaine de la mesure électromagnétique de haute précision. La France n'avait pas accueilli cet événement depuis plus de 25 ans. Cette édition était d'autant plus importante qu'elle coïncide avec une date clé de l'histoire du Système international d'unités : l'adoption, en novembre 2018, par la CGPM des nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, de la mole et du kelvin. Plusieurs sessions sont ainsi revenues sur les redéfinitions à venir de ces unités de mesures et sur leur mise en pratique. Ouverte par Thomas Grenon, directeur général du LNE, cette semaine de conférences réunissant 529 personnes de 47 pays différents, a notamment vu les présentations de deux prestigieux invités : les prix Nobel de physique Serge Haroche et Klaus von Klitzing.

Mais au-delà de la révision du SI de nombreux autres sujets ont été abordés pendant cette semaine :

- Temps-Fréquence
- Etalons électriques quantiques
- Métrologie optique et photonique
- Nouveaux capteurs
- Le courant
- La tension électrique
- Résistance en courant continu
- Impédance
- Magnétisme
- Puissance et énergie
- Fort courant et haute tension Radiofréquence et micro-onde

Cette semaine a également été ponctuée de visites de laboratoires permettant aux participants de découvrir le site du LNE à Trappes ainsi que ceux de l'Observatoire de Paris, deux laboratoires au cœur des enjeux de métrologie électrique. ■





REDÉFINITION DU KILOGRAMME, DE LA MOLE, DE L'AMPÈRE ET DU KELVIN.

# SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS : UNE ANNÉE HISTORIQUE

## RÉVISION DU SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS

**Maguelonne CHAMBON,**  
Directrice de la Recherche Scientifique et Technologique



*Le 16 novembre dernier, les Etats membres du BIPM ont adopté la révision du Système international d'unité (SI), modifiant ainsi la définition du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole. Ce vote revêt un caractère historique ?*  
Absolument. C'est la première fois que quatre unités voyaient leur définition changer simultanément. Ainsi, dans un système désormais d'une très grande cohérence, la totalité des sept unités de base est définie à partir de constantes fondamentales de la physique. Du reste, par cette révision, le BIPM abandonne l'artefact matériel, un cylindre de platine, qui depuis 1889 définissait le kilogramme. Un changement d'une telle ampleur ne s'était jamais produit !

« *Au moment du vote, l'euphorie et un soupçon de fébrilité étaient palpables ! C'était très émouvant.* »

*En tant que Directrice de la recherche scientifique et de la technologique du LNE, vous avez assisté au vote. Pouvez-vous nous faire partager l'ambiance de cet événement ?*  
C'était à la fois solennel, un peu formel, et en même temps très convivial. Il ne faut pas oublier que la Conférence générale des poids et mesures, qui se tient environ tous les quatre ans, est un événement diplomatique qui regroupe 101 pays (59 états membres et 42 associés) liés par la Convention du mètre, soit le plus ancien traité international scientifique aujourd'hui en vigueur. Ce n'est pas rien ! D'autant que cette année, environ 400 personnes, diplomates et scientifiques, étaient présentes, soit le double de l'effectif habituel, dont les deux prix Nobel de physique Klaus von Klitzing et Bill Phillips. Toutes les résolutions adoptées avaient été bien évidemment préparées très en amont, et sont le fruit d'au moins une décennie de travail scientifique ; mais au moment du vote, l'euphorie et un soupçon de fébrilité étaient palpables ! C'était très émouvant.

*D'autant j'imagine que le LNE a contribué largement à cette révolution ?*  
Oui, le LNE, mais aussi les autres laboratoires de la métrologie française qui sont dans des grands établissements comme le CNAM ou l'Observatoire de Paris, ont directement participé à la redéfinition de trois des quatre unités concernées

par la révision. Ainsi, nous figurons parmi les trois équipes à avoir mesuré la constante de Planck,  $h$  (à partir de l'expérience dite de balance du watt), constante sur laquelle est désormais fondé le kilogramme, avec le minimum d'incertitude. Concernant la mesure de  $k$ , la constante de Boltzmann, pour la définition du kelvin, nos équipes ont établi un record mondial en effectuant la mesure avec la plus faible incertitude jamais réalisée. Enfin, le LNE a réalisé le premier étalon quantique de l'ampère qui matérialise donc la nouvelle définition de l'unité de courant. Le jour du vote, j'ai dit à mes équipes que nous pouvions donc être fiers du travail accompli. Non seulement au LNE, mais également en collaboration avec tous nos collègues à travers le monde. Car ne l'oublions pas, au-delà de la contribution des uns et des autres, la métrologie est une aventure collective, celle de toute une communauté, ce que nous avons tous ressenti le 16 novembre.





26<sup>ÈME</sup> CONFÉRENCE GÉNÉRALE  
DES POIDS ET MESURES À VERSAILLES.

#### La révision du SI a été également une magnifique occasion de communiquer en direction du grand public.

En effet, et à cet égard, nous sommes très heureux du succès remporté par le cycle de sept conférences, une par unité de base, que nous avons organisé au LNE, de même que part les différentes manifestations que nous avons proposées dans le cadre de la Fête de la science. Nous avons aussi par ailleurs été un contributeur important de l'exposition proposée sur le SI au Musée des Arts et Métiers, à Paris. C'est d'ailleurs là que s'est tenue la soirée qui a suivi la Conférence, et nous avons reçu de très bons échos sur cette exposition que je vous invite à voir ! Pour l'occasion, de nombreuses délégations ont proposé de petites animations ou des goodies : tasses imprimées, pins, jeux, films... c'était festif et très sympathique.

#### Au-delà de l'adoption de la révision du SI, quelles seront les conséquences ?

Tout d'abord, les nouvelles définitions ne prendront effet que le 20 mai 2019, le temps que soient prises un certain nombre de dispositions légales. Ensuite, il ne faut pas s'attendre à un bouleversement, puisque tout a été fait pour assurer une continuité entre l'ancien et le nouveau système. Pour autant, dans les laboratoires et les industries, un certain nombre de mesures vont petit à petit pouvoir être faites avec une précision accrue. Par ailleurs, plus de précision, cela signifie probablement de nouvelles applications, de la même manière que la révision de la définition de la seconde, en 1983, a permis le développement des systèmes de positionnement et de navigation, tel le GPS. Lesquelles cette fois-ci ? Seul l'avenir nous le dira ! ■



COMPARATEUR CRYOGÉNIQUE DE COURANT.

## LA SECONDE OPTIQUE EN LIGNE DE MIRE

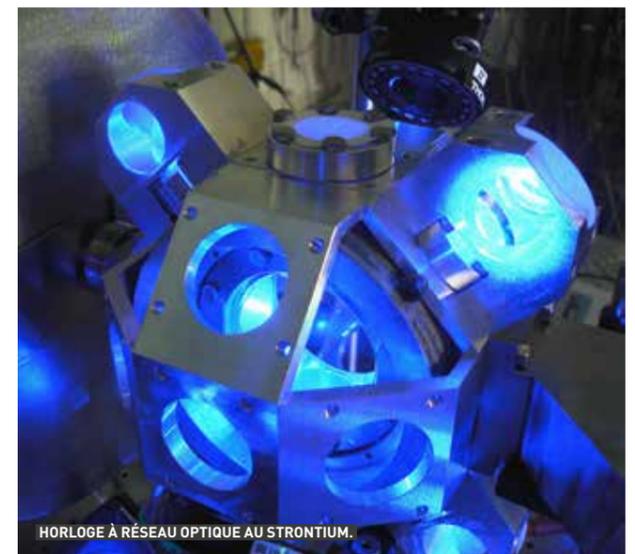
Une nouvelle génération d'horloges atomiques, dites optiques, supplantera peut-être bientôt les horloges au césium pour la définition de l'unité de temps. Les travaux du LNE-SYRTE se rapprochent un peu plus de cette possible révolution.

Déterminée avec une incertitude de l'ordre de  $10^{-16}$ , la seconde est aujourd'hui l'unité du Système international 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. Ce dont témoignent les travaux réalisés au LNE-SYRTE en 2018 sur les horloges dites à atomes de strontium.

Actuellement, la seconde est définie à partir de la fréquence de transition entre deux niveaux d'énergie de l'atome de césium. Pour faire mieux, les spécialistes envisagent de troquer cette définition fondée sur une fréquence située dans le domaine micro-onde, par une autre, plus élevée, située dans la partie dite optique du spectre électromagnétique. Pour ce faire, une possibilité est d'utiliser des horloges atomiques au strontium, dont le laboratoire s'est fait une spécialité depuis plusieurs années. Pour que ces horloges puissent prétendre, à terme, au titre d'étalon de référence, reste néanmoins à en comprendre toutes les subtilités. Ainsi, l'année passée, les scientifiques du LNE-SYRTE ont poursuivi leurs travaux visant à comprendre et pallier toutes les sources d'incertitude affectant potentiellement leurs deux horloges au strontium. «*Nous avons notamment étudié l'effet des collisions entre les atomes de strontium et le gaz résiduel présent dans l'enceinte à vide qui les contient,*

*explique Jérôme Lodewyck. Précisément, nous avons, pour la première fois mesuré, la façon dont cet effet affecte la précision de nos horloges et comparé nos résultats avec des prédictions théoriques.*»

Par ailleurs, après une première campagne en 2017, le laboratoire a participé à deux nouvelles campagnes de comparaison par fibre de la précision des horloges optiques des différents laboratoires européens de métrologie du temps. «*Des comparaisons routinières sont indispensables pour assurer la robustesse de nos horloges dans la durée. Et la reproductibilité des horloges optiques devra être démontrée au niveau international avant que l'unité de temps ne soit redéfinie sur la base*



HORLOGE À RÉSEAU OPTIQUE AU STRONTIUM.

*d'une fréquence optique», précise le scientifique.*

Enfin, pour la première fois, les scientifiques du laboratoire ont utilisé une horloge optique pour l'étalonnage de l'échelle de temps TAI (Temps Atomique International), en complément de celui réalisé en routine avec des horloges au césium. «*Après des premiers résultats en 2017, ces étalonnages ont été intégrés en temps réel à la Circulaire T par laquelle le Bureau international des poids et mesures définit le temps TAI», explique le physicien. Si cette innovation n'a pas encore eu d'influence sur la précision de l'unité de temps, elle démontre un peu plus le potentiel des horloges optiques comme*

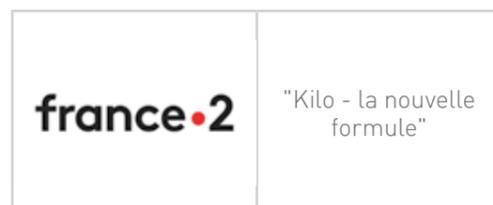
*étalon temporel. Elle confirme également le rôle de leader du LNE-SYRTE, dont les étalons contribuent pour 40 % aux étalonnages primaires de l'unité de temps, pour la calibration du temps TAI.* ■

«*La reproductibilité des horloges optiques devra être démontrée au niveau international avant que l'unité de temps ne soit redéfinie sur la base d'une fréquence optique.*»

Jérôme Lodewyck, chercheur au LNE-SYRTE.

# LE SI DANS LA PRESSE

La révision des unités du Système international a connu un écho dans la presse du monde entier. En France, les plus grands médias se sont emparés de cette actualité permettant ainsi de mettre en lumière la métrologie auprès du grand public et de valoriser le rôle du LNE dans ces changements.



# DES ÉVÉNEMENTS TOURNÉS VERS LE GRAND PUBLIC

Si les nouvelles définitions du Système international d'unités ont été pensées pour ne pas bouleverser le quotidien de chacun, ces changements concernent néanmoins tout le monde. Aussi afin de sensibiliser le grand public à cette révolution dans le monde de la mesure, le LNE a organisé différents événements proposant des clés pour comprendre tous les enjeux de la métrologie.



## CYCLE DE CONFÉRENCES SUR LES UNITÉS DE MESURE DU SI

Tout au long de l'année 2018, le LNE a organisé un cycle de conférences sur le thème «Évolution des unités de mesure : une révolution ?» et au cours duquel sont intervenus des chercheurs du LNE et des laboratoires du Réseau national de la métrologie française. Chacun des 7 chercheurs est revenu sur une unité du SI pour revenir sur leurs évolutions, en expliquer les implications dans notre quotidien et présenter les futures évolutions. Enseignants-chercheurs, étudiants et lycéens, professeurs, ingénieurs et techniciens, salariés et retraités, familiers avec la métrologie, simples curieux et passionnés de science, près de sept cents personnes ont assisté aux 7 conférences du cycle «LES JEUDIS DE LA MESURE». Toutes les conférences sont à retrouver en intégralité sur la chaîne Youtube du LNE:

- «*Le mètre, l'aventure continue...*» - Marc HIMBERT, LNE-LCM/Cnam.
- «*La candela, une touche d'humain dans les unités de mesure*» - Gaël OBEIN, LNE-LCM/Cnam.
- «*La mole : pourquoi une unité spécifique à la chimie ?*» - Sophie VASLIN-REIMANN, LNE.
- «*La seconde : vers une redéfinition*» - Sébastien BIZE, LNE-SYRTE / Observatoire de Paris - PSL.
- «*Le kelvin : de l'artefact à la constante de Boltzmann*» - Laurent PITRE, LNE-LCM/Cnam.
- «*Le kilogramme : de l'artefact à la constante de Planck*» - Matthieu THOMAS, LNE-LCM.
- «*L'ampère ou les unités électriques à l'ère quantique*» - Wilfrid POIRIER, LNE. ■

## FÊTE DE LA SCIENCE

Dans le cadre de la Fête de la Science, le LNE a invité le grand public à partir à la découverte des unités de mesure. A travers des visites de laboratoires et des ateliers découvertes, les visiteurs ont pu en apprendre plus sur ces unités et leur définition. Ils ont découvert comment ces unités sont utilisées dans notre quotidien grâce à des ateliers sur la mesure de la qualité de l'air, de l'alcoolémie, des nanoparticules ou encore sur la vérification de la mesure d'une balance de cuisine ou d'un radar de vitesse. Plusieurs circuits à destination des scolaires, ont été organisés pour leur faire découvrir le métier de métrologue sur ses sites de Paris et Trappes. Au travers d'ateliers ludiques, les métrologues ont fait découvrir aux élèves les concepts clés de la science de la mesure : étalons, incertitude, Système international d'unités (SI), mesure de référence. ■



## EXPOSITION «SUR MESURE, LES 7 UNITÉS DU MONDE»

En partenariat avec le Musée des Arts et Métiers, le LNE a co-construit l'exposition « Sur mesure, les 7 unités du Monde ». Les redéfinitions de quatre des sept unités du SI (le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole), étaient la parfaite occasion pour revenir sur les différents aspects de la mesure dans le cadre d'une exposition accessible à tous. Inaugurée le 16 octobre 2018, l'exposition aborde la mesure sous différents angles : la mesure de l'Homme (incarquée par le célèbre Homme de Vitruve de Léonard de Vinci) ; la complexité de l'acte de mesurer et la charge symbolique de la mesure ; le rôle

essentiel de la métrologie, la science de la mesure, dans les secteurs de la recherche et de l'industrie. Le cœur de l'exposition permet aux visiteurs de découvrir les 7 unités de base du Système international sur lesquelles reposent toutes les mesures de notre univers. Cet espace agrémenté de bornes sonores invite à «rencontrer» un ingénieur, un chercheur ou un professeur qui explique pourquoi et comment sont définies chacune de ces unités. En 2018, l'exposition a attiré près de 10 000 visiteurs venus découvrir l'univers de la métrologie. ■



# LE PRIX LNE DE LA RECHERCHE

## 10<sup>ème</sup> Prix LNE de la recherche : Wilfrid Poirier et Félicien Schopfer récompensés pour leurs travaux en métrologie électrique.

**Vous avez reçu cette année le Prix LNE de la recherche, que représente pour vous cette distinction ?**

**Félicien Schopfer :** C'est d'abord la récompense d'une équipe, comme en témoigne le fait que nous soyons deux lauréats. Et c'est celle d'un travail ayant certes permis des résultats marquants ces dernières années, mais dont la cohérence s'étend sur deux décennies.

**Wilfrid Poirier :** C'est en effet l'aboutissement d'une démarche où se mêlent la volonté de pousser au maximum la connaissance fondamentale des systèmes sur lesquels nous travaillons, l'expertise instrumentale et métrologique et l'envie d'emprunter des voies originales.

**Vous êtes des spécialistes de l'effet Hall quantique appliqué à la métrologie électrique. Pouvez-vous nous expliquer en quoi consiste votre travail ?**

**Wilfrid Poirier :** En tant que métrologue de l'électricité, notre travail consiste à proposer, mettre en œuvre et maintenir des étalons de référence pour les unités électriques. Plus précisément, Félicien et moi sommes des spécialistes de l'effet Hall quantique grâce auquel il est possible de réaliser des étalons de résistance. Ces dernières années, nous avons également proposé le premier étalon quantique réalisant la nouvelle définition de l'ampère, telle qu'adoptée le 16 novembre 2018 lors de la Conférence générale des poids et mesures.

**Quel est le lien entre l'effet Hall quantique et la métrologie électrique ?**

**Félicien Schopfer :** Lorsque l'on soumet un conducteur parcouru par un courant à un champ magnétique perpendiculaire à ce courant, on observe une différence de potentiel électrique, ou tension électrique, entre les bords de ce conducteur dans la troisième direction. C'est l'effet Hall classique. En 1980, Klaus von Klitzing a montré qu'à très basse température et sous champ fort, une version quantique de cet effet existe dans certains matériaux : le rapport entre la tension et le courant, qui définit la résistance de Hall, varie par sauts discontinus lorsqu'on augmente le champ magnétique, prenant des valeurs sous-multiples de  $h/e^2$ , où  $h$  est la constante de Planck et  $e$  la charge électrique élémentaire. Parce que ce phénomène est robuste, a priori indépendant du matériau dans lequel on l'observe et directement relié à des constantes fondamentales, sa réalisation permet de définir des étalons de résistance eux-mêmes très reproductibles.

**A partir de là, quel a été le fil conducteur de vos différents travaux ?**

**Wilfrid Poirier :** Améliorer la réalisation des unités électriques, et en particulier de l'unité de résistance. Ainsi, ma première réalisation marquante, à laquelle Félicien a contribué à partir de 2005, a consisté en des étalons couvrant une gamme de résistances comprises entre 100 ohms et 1 mégohm. Pour ce faire, nous utilisons un montage impliquant la mise en parallèle et en série, via des liens lithographiques, de plusieurs centaines de barres de Hall en arséniure de gallium. Celui-ci est actuellement le matériau privilégié pour la réalisation de l'effet Hall quantique pour ces applications en métrologie. Mais avec un seul composant, on accède à une seule valeur de la résistance Hall qui soit vraiment bien quantifiée, d'où ensuite la difficulté de garantir la traçabilité de l'unité de résistance sur une large gamme de valeurs. La mise en série et en parallèle de nombreux composants résout ce problème.

**C'est avec ce type de montage que vous avez par la suite réalisé des tests d'universalité record ?**

**Félicien Schopfer :** En effet, en connectant quatre barres de Hall, afin de réaliser l'équivalent quantique d'un pont de Wheatstone, nous avons démontré en 2008 la reproductibilité de l'effet Hall quantique dans différents dispositifs en arséniure de gallium dans la limite d'une incertitude relative record de  $3 \times 10^{-11}$ . Plus récemment, nous avons par ailleurs étendu ces tests d'universalité en montrant que l'effet Hall quantique mis en œuvre dans l'arséniure de gallium ou le graphène conduit au même niveau de quantification de la résistance de Hall, avec là encore une incertitude record de  $8,2 \times 10^{-11}$ .

**Le graphène vous a par ailleurs permis de réaliser récemment un étalon de résistance original ?**

**Félicien Schopfer :** Notre groupe a lancé une activité graphène dès 2007, très peu de temps après la mise en évidence de ses remarquables propriétés de transport électronique. En effet dans ce cas, l'effet Hall est moins sensible à la température et au courant de mesure, et réalisable sous un moindre champ magnétique que dans l'arséniure de gallium. Ainsi, en 2015, après de nombreux développements, notamment en collaboration avec des laboratoires du CNRS, notamment le C2N et le CRHEA, nous avons mis en œuvre un étalon de résistance en graphène, avec une exactitude de  $10^{-9}$  dans des conditions expérimentales très favorables, démontrant le potentiel de ce matériau pour une métrologie électrique quantique simplifiée.



**En parallèle, vous avez également proposé un dispositif permettant de réaliser la nouvelle définition de l'ampère, et ce avec une exactitude inégalée ?**

**Wilfrid Poirier :** Exact. Avec le renfort de notre collègue Sophie Djordjevic, nous avons mis en œuvre le premier circuit quantique permettant d'appliquer directement la loi d'Ohm, qui relie courant, tension et résistance, sur les étalons quantiques de tension et de résistance. Pour ce faire, nous avons utilisé la même solution que celle mise en œuvre dans nos réseaux de barres de Hall pour nous affranchir des résistances parasites associées aux connexions électriques reliant les deux étalons, à l'origine d'erreurs sur le courant quantique de référence. Ainsi nous avons réalisé un étalon délivrant un courant proportionnel à la charge élémentaire,  $e$ , constante sur laquelle est fondée la nouvelle définition de l'ampère. Notre étalon est par ailleurs exact à  $10^{-8}$  près, contre  $10^{-6}$  avec des dispositifs plus classiques.

**Quels sont vos projets pour le futur ?**

**Félicien Schopfer :** Concernant notre étalon de résistance en graphène, après en avoir présenté une démonstration de principe, nous devons désormais le stabiliser, avec l'objectif de faire de ce matériau la future référence du domaine. Nous avons également pour projet de réaliser une version de notre étalon de courant incorporant du graphène, un atout pour le simplifier. D'un point de vue plus général, nous allons poursuivre le développement de notre étalon de courant en lui consacrant une expérience complète et indépendante. L'objectif est de le pérenniser et de gagner un facteur 10 sur son exactitude.

**Wilfrid Poirier :** Nous collaborons également avec le CEA qui souhaite mettre à profit l'effet Hall quantique pour détecter de très faibles courants, éventuellement une charge unique. Dans ce cadre, nous intervenons en appui, pour la caractérisation fine de l'effet Hall quantique de leurs échantillons de graphène à l'état de l'art.

On peut envisager à long terme des applications de ces travaux pour la réalisation de capteurs ultra sensibles. Par ailleurs, cette activité nous permet de comparer l'intérêt des différentes technologies de production et de mise en œuvre du graphène pour l'étalon quantique de résistance, tout en incorporant un savoir-faire en terme de mesures rapides à hautes fréquences. Il s'agit de la constitution d'un nouveau terreau pour le futur, selon une méthode qui nous a plutôt réussi jusqu'à présent ! ■

## HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

### CÉCILE GUIANVARC'H

10 DÉCEMBRE 2018

Le 10 décembre dernier, Cécile Guianvarc'h, maître de conférences au Cnam, a soutenu son Habilitation à Diriger des Recherches intitulée «Acoustique pour la métrologie – Métrologie pour l'acoustique».

Elle y a rappelé, entre autres, sa participation à la mise en place du banc primaire du LNE pour l'étalonnage de microphones ainsi que sa contribution à la détermination de la constante de Boltzmann dans le cadre de la révision du SI adoptée en 2018. En parallèle, Cécile Guianvarc'h a développé une activité instrumentale et théorique pour l'adaptation de méthodes acoustiques pour l'étude de mélanges gazeux.

La métrologue a également présenté ses projets visant à se rapprocher de problématiques de «terrain». D'un côté, le développement de moyens acoustiques pour mesurer la température de l'air en milieux ouverts et/ou industriels. De l'autre, la caractérisation de dispositifs de mesures acoustiques de manière plus large, par exemple pour le contrôle *in situ* de dérives d'antennes microphoniques ou pour l'optimisation de bancs de mesure à échelle réduite dédiés à l'étude de techniques d'imagerie sismique en milieux complexes. ■

### CARINE CHIVAS-JOLY

29 OCTOBRE 2018

Docteur Ingénieur de recherche à la Direction de la métrologie scientifique et industrielle du LNE, Carine Chivas-Joly a soutenu son Habilitation à diriger des recherches le 29 octobre dernier sur le thème «Développements de caractérisations des nanoparticules en milieux complexes.»

Chimiste de formation, Carine Chivas-Joly a participé très tôt à des travaux sur la combustion des composites nano-structurés. Dans ce cadre, elle a notamment mis au point un banc permettant de recueillir différents produits de combustion, avant analyse de leur contenu en nanoparticules sur la plateforme CARMEN, plateforme de caractérisation de nanomatériaux.

Ses recherches se poursuivent sur l'ensemble du cycle de vie de tout type de matériaux chargés en nanoparticules (produits pharmaceutiques, cosmétiques, polymères, alimentaires...). Pour ce faire, la spécialiste entend s'appuyer sur différentes techniques expérimentales, soit directes, tel l'AFM métrologique (Atomic Force Microscopy), soit indirectes, telles la diffusion des rayons X aux petits angles, la diffusion dynamique de la lumière et la diffraction X. De quoi étendre les possibilités de CARMEN aux milieux complexes. ■

### SÉBASTIEN BIZE

25 JUIN 2018

Docteur en physique atomique, chercheur au CNRS et responsable du LNE-SYRTE à l'Observatoire de Paris, Sébastien Bize a soutenu son habilitation à diriger des recherches le 25 juin dernier sur le thème «développements et applications des étalons de fréquence que ce soit dans le domaine des fréquences micro-ondes ou fréquences optiques».

Le LNE-SYRTE est le laboratoire de référence de temps et fréquences. Il a pour cela développé depuis les années 1980, des étalons primaires à atomes de césium sur le principe de jet à pompage optique, puis des fontaines de jet à atomes froids dans les années 1990. Sébastien Bize a démarré ses travaux sur des étalons de fréquences à atomes refroidis fonctionnant simultanément avec des atomes de césium et de rubidium. Une première ! Les exactitudes s'améliorant en montant en fréquence, il a poursuivi ses recherches sur des étalons de fréquences dans le domaine optique avec la réalisation d'un étalon à atomes de mercure. Cela a permis des comparaisons avec les étalons de fréquences à atomes de strontium du laboratoire. Actuellement, à la tête du laboratoire, les travaux poursuivis concernent le développement de liens optiques fibrés pour les comparaisons longues distances d'étalons de fréquences optiques, la poursuite des programmes spatiaux PHARAO (Programme d'Horloges à Atomes Refroidis en Orbite) et ACES (*Atomic Clock Ensemble in Space*), sans compter tous les projets liés à l'interférométrie atomique. ■

### GAËL OBEIN

26 NOVEMBRE 2018

Le 26 novembre dernier, Gaël Obein a soutenu son Habilitation à Diriger des Recherches sur le thème «Métrologie de l'apparence». A l'interface de la mesure et de la sensation visuelle, cette discipline vise à mettre sur pied une métrologie des grandeurs qui caractérisent l'aspect visuel d'un objet.

Le chercheur a notamment démontré, via des expériences psycho-visuelles, que la sensation de brillant d'un objet ne dépend pas de l'éclairage sous lequel on l'observe. En parallèle, Gaël Obein a développé l'instrument de référence pour la mesure de la grandeur radiométrique permettant de caractériser l'apparence d'une surface, soit un goniospectrophotomètre qui mesure de la «fonction de répartition bidirectionnel du facteur de réflexion», ou RTBF.

Pour l'avenir, Gaël Obein a le projet de conduire des travaux analogues sur la translucidité. En même temps, il entend développer l'accès de son instrumentation à d'autres communautés, tels les spécialistes des surfaces fonctionnelles. Enfin, le scientifique a rappelé son activité de coordination à l'échelle européenne d'une jeune discipline cruciale pour l'industrie. ■

## THÈSES

### PLANIFICATION D'EXPÉRIENCES NUMÉRIQUES EN MULTI-FIDÉLITÉ : APPLICATION À UN SIMULATEUR D'INCENDIES

Le 26 juin 2018, Rémy Stroh a soutenu sa thèse de doctorat portant sur l'étude de modèles numériques multi-fidèles. L'intérêt d'une approche multi-fidèle est de combiner les résultats obtenus aux différents niveaux de fidélité (peu coûteuse mais de basse fidélité et haute-fidélité mais coûteuse) afin d'économiser du temps de simulation. Ses travaux, menés au LNE, ont été appliqués à la sécurité incendie avec pour objectif d'estimer les probabilités de défaillance d'un système de désenfumage.

### AMÉLIORATION DE LA MESURE DE L'ACTIVITÉ DE DOSIMÈTRES ÉMETTEURS DE RAYONS X IRRADIÉS EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Le 11 juillet 2018, Jonathan Riffaud a soutenu sa thèse de doctorat portant sur la mesure de l'activité des dosimètres irradiés en réacteur. La dosimétrie en réacteur permet de déterminer la fluence neutronique reçue pendant une irradiation et d'en caractériser le spectre (distribution énergétique des neutrons). Cette technique s'appuie sur la mesure de l'activité de dosimètres irradiés, constitués de métaux purs ou d'alliages. La mesure d'activité de ces échantillons est réalisée par spectrométrie gamma et X sur des rayonnements de faibles énergies (< 100 keV) et s'appuie actuellement sur un dosimètre étalon adapté et validé spécifiquement pour les conditions de mesure. Le but de la thèse est de s'affranchir de cette étape et de pouvoir mesurer directement l'activité des dosimètres. Ses travaux ont été menés au sein du LNE-LNHB (Laboratoire national Henri Becquerel).

### DISPOSITIFS DE MESURE DE CONSTANTES DIÉLECTRIQUES DANS LES MATÉRIAUX HUMIDES

Le 17 juillet 2018, Mohamed Wajdi Ben Ayoub a soutenu sa thèse de doctorat visant à améliorer la traçabilité de la mesure de l'humidité des solides. Ses travaux ont été menés au LNE-CETIAT (Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques). Au niveau industriel, les capteurs électriques de mesure de la teneur en eau dans les solides sont généralement mono fréquentiel. La fréquence de fonctionnement est choisie arbitrairement. Par contre, la sensibilité de la teneur en eau dépend du type de matériau et des liaisons d'eau existantes. D'une part, la fréquence de relaxation diélectrique de l'eau à l'état liquide est située dans la bande des micro-ondes. D'autre part, la fréquence de relaxation diélectrique de l'eau liée dépend du matériau mais elle est dans la bande des radiofréquences. En se basant sur cette hypothèse, le but de cette thèse a consisté à analyser la sensibilité fréquentielle vis-à-vis les liaisons d'eau dans les solides en utilisant comme un paramètre intermédiaire la permittivité diélectrique complexe.

### INFLUENCE DU VIEILLISSEMENT SUR LE COMPORTEMENT AU FEU DE FORMULATIONS HÉTÉROPHASÉES IGNIFUGÉES

Le 16 novembre 2018, Rémy Mangin a soutenu sa thèse de doctorat visant à étudier l'impact du vieillissement sur les performances au feu de systèmes complexes de polymères ignifugés. Dans le cadre de ses travaux menés au LNE, un protocole de vieillissement et une méthodologie d'étude ont été mis en place pour déterminer l'influence du vieillissement sur les propriétés de ces matériaux : morphologie, masse molaire des polymères, dégradation des retardateurs de flamme, comportement au feu. Enfin, les caractéristiques des produits émis en phase gaz au cours de la combustion d'échantillons vieillissants et non vieillissants ont été analysées.

### UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'ÉTALONS QUANTIQUES FONDÉE SUR L'EFFET HALL QUANTIQUE

Le 7 décembre 2018, Jérémy Brun-Picard a soutenu sa thèse de doctorat portant sur le développement et l'étude d'un étalon de résistance fondé sur l'effet Hall quantique (EHQ) dans du graphène obtenu par dépôt chimique en phase vapeur (propane/hydrogène) sur substrat de carbure de silicium. Ces travaux, menés au LNE, ont démontré, pour la première fois, qu'un étalon de résistance en graphène pouvait fonctionner à des conditions expérimentales plus pratiques que son homologue en GaAs/AlGaAs (arséniure de gallium/arséniure de gallium-aluminium), c'est-à-dire à des températures plus élevées ( $T \approx 10$  K), des champs magnétiques plus faibles ( $B \approx 3,5$  T) et des courants de mesures plus importants ( $I \approx 500$   $\mu$ A).

### DÉVELOPPEMENT D'UN ÉTALON DE PRESSION ACOUSTIQUE POUR LES CAPTEURS INFRASONORES À 1 HZ

Le 10 décembre 2018, Paul Vincent a soutenu sa thèse de doctorat visant à apporter une couverture métrologique au domaine de l'acoustique infrasonore (fréquences inférieures à 20 Hz). Les travaux de recherche ont été menés entre le laboratoire de métrologie acoustique du LNE et le CEA. Aujourd'hui, il n'existe pas d'étalon de référence pour la grandeur physique des pressions dynamiques infrasonores. En effet la demande d'étalonnage d'une telle grandeur est apparue récemment. Dans le but de répondre à ce nouvel enjeu, cette thèse a eu pour objectif la réalisation d'un étalon primaire, basé sur un pistonphone calculable, pour cette grandeur. ■

# LE RÉSEAU NATIONAL DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE

## LES LABORATOIRES NATIONAUX DE MÉTROLOGIE

### LNE-LCM/LNE-Cnam

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

### LNE

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

### LNE-LNHB/CEA

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

### LNE-SYRTE/OP

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

## LES LABORATOIRES ASSOCIÉS AU LNE

### LNE-CETIAT

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

### LNE-ENSAM

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

### LNE-IRSN

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

### LNE-LADG

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

### LNE-LTFB

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

### LNE-TRAPIL

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

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

Rédaction : Mathieu Grousson / LNE - Réalisation : LNE  
Crédits photos : Philippe Stroppa : p. 1, 3, 8, 9, 18, 22, 24, 25, 28, 30, 32, 39 - LNE : p. 14, 15, 16, 17, 20, 21, 29, 31, 36, 37, 39 - LNE-CETIAT : p. 10 - LNE-LNHB : p. 11, 13, 27 - Fotolia : p. 12 - µQuans : p. 19 - AdobeStock : p. 26 - Guillaume Grandin : p. 29 - LNE-Cnam : p. 30 - BIPM : p. 32 - Jérôme Lodewyck : p. 33 - Cnam : p. 37 - DR

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

lne.fr



CRÉER  
LA  
CONFIANCE