



LABORATOIRE NATIONAL DE MÉTROLOGIE ET D'ESSAIS

RAPPORT D'ACTIVITÉ RECHERCHE 2016

www.lne.fr

Thomas GRENON,
Directeur général



ÊTRE PRÉCURSEUR POUR PRÉPARER LES DÉFIS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES DE DEMAIN

En 2016, le LNE a démontré sa capacité à s'inscrire dans une perspective d'avenir, à faire des choix, tout en engageant un redressement spectaculaire.

Je voudrais remercier très sincèrement tous les collaborateurs et tous les partenaires du LNE qui nous ont accompagnés au long de cette année de changement.

Le Laboratoire a pour mission de mettre à la disposition des industriels et du monde académique des mesures toujours plus justes, précises, traçables et raccordées au Système international d'unités (SI). Pour tous les domaines, il doit accompagner, voire anticiper les changements scientifiques, industriels ou sociétaux.

La recherche est au cœur de cette mission de service public et occupe une place centrale dans l'ensemble de nos activités, qu'elle soit fondamentale, pour la redéfinition des unités du SI dans laquelle nous sommes fortement mobilisés, ou appliquée.

L'efficacité de la métrologie française est indispensable, non seulement pour garantir la santé

et la sécurité de nos concitoyens, mais aussi pour développer la compétitivité de l'industrie française. Le LNE est fortement impliqué dans les programmes de recherche européens co-financés par la Commission européenne.

Dans ce contexte, notre stratégie se développe aux niveaux européen et international, et s'inscrit autour de cinq axes qui fédèrent tous les programmes de recherche :

- > environnement-efficacité énergétique-*Cleantech*,
- > santé,
- > propriétés et caractérisation des matériaux et nanomatériaux,
- > usine du futur-procédés de fabrication,
- > économie numérique-sécurité de l'information.

Grâce à l'excellence de ses équipes de chercheurs et d'ingénieurs, le LNE prépare les défis scientifiques et technologiques de demain, il répond aux besoins des entreprises et de la société et se veut précurseur dans un monde rapide et dynamique.

TROIS QUESTIONS À...

Maguelonne CHAMBON,
Directrice de la Recherche
Scientifique et Technologique



REDÉFINITION DU SI, TRANSFERT VERS L'INDUSTRIE ET NOUVEAUX ENJEUX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES : LA RECHERCHE EN PREMIÈRE LIGNE AU LNE ET DANS LES LABORATOIRES DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE

Redéfinition du SI, quels progrès et résultats ?

L'importance de la redéfinition des unités du SI est considérable, certaines unités n'ayant pas vu leur définition évoluer depuis plus de 100 ans, comme le kilogramme. Le sujet est à la fois scientifique, international et sociétal, car il a un impact majeur sur la vie courante.

À ce jour, le système international d'unités, le SI, est constitué de sept unités de base : le mètre (m), le kilogramme (kg), la seconde (s), l'ampère (A), le kelvin (K), la candela (cd) et la mole (mol). Ces unités sont partout autour de nous. Utilisées par tous au quotidien sans en connaître les fondements, les origines ni vraiment les définitions, elles sont essentielles dans la science, dans l'industrie et la vie courante. La plupart remontent à de nombreuses années, comme le kilogramme dont le prototype sous forme de cylindre de platine et d'iridium sert d'étalon depuis 1889 et est conservé au BIPM (Bureau international des poids et mesures) à Sèvres.

Or, les enjeux de notre époque sont majeurs, en particulier dans l'industrie et pour l'économie : il faut des unités dont les définitions permettent d'améliorer les précisions de mesures qui deviennent de plus en plus fines avec les progrès technologiques, et qui permettent une traçabilité à ces unités, c'est-à-dire une comparabilité, de plus en plus fiable.

La percée des nanotechnologies ou des nouvelles technologies quantiques, par exemple, a une conséquence inattendue : l'exigence de précision est telle qu'il faut améliorer les incertitudes de mesure et même redéfinir certaines unités.

Par exemple, dans les télécoms ou en astronomie, il faut des mesures hautes fréquences de plus en plus exactes, de même pour les très hautes températures dans l'industrie. On arrive aux limites des mesures actuelles.

Sur les sept unités du SI, quatre définitions vont être reformulées dans l'immédiat. La seconde et la candela nécessitent encore des travaux complémentaires avant des modifications de fond. Il s'agit de recherches à long terme, vastes et complexes, qui ont pour objectif de s'affranchir d'artefacts matériels, et d'avoir des définitions plus universelles en les faisant reposer sur des constantes fondamentales invariantes, et par là-même de mettre en phase ces définitions avec la physique moderne.

Dans ce contexte, le LNE et les laboratoires du Réseau national de la métrologie française (RNMf) ont initié un certain nombre d'expériences et collaborent avec d'autres laboratoires dans le monde pour participer à ces redéfinitions.

Sur les quatre unités qui seront redéfinies à l'horizon 2018 lors de la 26^{ème} Conférence générale des poids et mesures (le kilogramme, l'ampère, le kelvin et également la mole à partir de la constante d'Avogadro), le RNMf s'est fortement impliqué dans la redéfinition des trois premières. Aux côtés d'autres grands laboratoires internationaux, la métrologie française a d'ores et déjà obtenu des résultats significatifs pour le kg électrique basé sur la constante de Planck, l'ampère quantique redéfini à partir de la charge élémentaire et dont les travaux sont exposés dans ce rapport d'activité, et le kelvin défini à partir d'un thermomètre acoustique.

Le transfert vers l'industrie est donc plus que jamais une clé de lecture des travaux de recherche du LNE ?

Transférer les outils conçus au LNE vers les industriels reste un des objectifs prioritaires de nos équipes R&D. En prenant part à des projets européens ambitieux et en resserrant les liens avec les pôles de compétitivité, le LNE s'ancre continuellement et profondément dans le tissu industriel. Un aboutissement naturel et une absolue nécessité pour donner aux entreprises les moyens de leur compétitivité et de leur croissance, quel que soit leur secteur d'activité.

Au-delà de l'animation et du pilotage du RNMF, et d'être un opérateur de référence pour un certain nombre de grandeurs en métrologie, le LNE réalise des prestations d'essais, d'assistance technique, de certification, de formation, au service de l'industrie, de la protection du consommateur et pour des enjeux sociétaux. Il est important que le LNE puisse travailler en partenariat avec les industriels français, dans ses domaines de compétence, et proposer des recherches pour répondre à leurs besoins.

À cet effet, le LNE assure le transfert de ses résultats de recherche à l'industrie et valorise ses compétences de diverses façons : publications scientifiques, participation à des conférences, séminaires et organisation de workshops et journées techniques ; intégration d'industriels dans les programmes de recherche partenariale et européens ; conception de moyens de mesure adaptés aux problématiques spécifiques des industriels sur la base de nos moyens de référence et de transfert, ainsi que certification de produits et de systèmes.

De nouveaux enjeux sont apparus en 2016...

En effet, comme le démontrent les 27 résultats majeurs présentés dans ce rapport, qui sont une photographie représentative de l'activité de nos chercheurs, que ce soit pour la recherche au service du citoyen, celle pour l'industrie ou encore les travaux du Réseau National de la Métrologie Française (RNMF), il s'agit là d'enjeux nouveaux ou naissants, qui sont essentiels. Je citerais la caractérisation des nano-objets, les aides aux diagnostics et aux traitements par l'étalonnage en matière de santé, tous les travaux autour des méthodes d'essais et de simulation pour aider au développement de solutions innovantes contribuant à une amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments... Ou encore la mécatronique et les simulations en vue du véhicule autonome.

SOMMAIRE

Diagnostic Alzheimer

Vers un meilleur dosage des biomarqueurs de la maladie 11

Mesure de la puissance acoustique

Un nouvel étalon plus fiable pour le bruit 12

Vers une radiothérapie stéréotaxique plus précise

Un dosimètre innovant pour une meilleure maîtrise
de la dose délivrée au patient 13

Radiothérapie de contact

Une référence indépendante de celle des constructeurs
pour doser les rayons X 14

Nanoparticules et santé publique

Mieux caractériser l'impact sur les fonctions cérébrales
des nano-objets émis lors de l'abrasion mécanique des peintures 15

Mesure de couples

De nouveaux bancs d'étalonnage pour une meilleure précision 17

Haute tension

Mesurer avec plus de précision les transformateurs
de nouvelle génération 18

Compatibilité électromagnétique

De nouvelles méthodes de mesure CEM au service de l'industrie 19

Mesure de rayonnements

Spectra-radiomètres : des mesures toujours aussi fiables,
mais moins coûteuses 20

Réflectométrie multidimensionnelle

Comprendre le brillant pour mieux le mesurer 21

AFM métrologique : une première en France

Développement d'un modèle numérique pour mieux estimer
l'incertitude de mesure de l'instrument 22

Efficacité énergétique

Enveloppe des bâtiments : deux projets innovants 23

LA RECHERCHE
AU SERVICE
DU CITOYEN

LA RECHERCHE
POUR L'INDUSTRIE



LES AVANCÉES SCIENTIFIQUES DU RÉSEAU NATIONAL DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE

Automatismes

De nouvelles méthodes d'évaluation pour le véhicule autonome et les robots domestiques 24

Sécurité sanitaire

Quand les huiles minérales des emballages contaminent les aliments 25

Mécatronique

Améliorer la fiabilité et la sécurité des systèmes 26

Stockage des déchets nucléaires

De meilleures performances métrologiques pour les systèmes de détection Raman DTS 27

Nouvelle définition du SI

L'ampère passe à l'ère quantique. 28

Composants et capteurs

Du nouveau dans la métrologie des impédances 29

Télécoms

MORSE affine les techniques de mesure pour les nouveaux réseaux 30

Industrie nucléaire

Des dosimètres plus performants 31

Longues distances

Réduire l'incertitude des mesures de distances kilométriques 32

Machines-outils

Améliorer l'exactitude des machines par un contrôle en ligne 33

Nano-objets

Une nouvelle technique pour la caractérisation métrologique 35

Spectrométrie

Développer des calorimètres magnétiques pour la spectrométrie X et bêta. 36

Mathématiques et statistiques

MATHMET, première plateforme européenne de métrologie dédiée 37

Horloge optique

Quand un laser redéfinit la seconde 38

Activité des radionucléides

Améliorer les références au service de la médecine nucléaire. 39

Philippe Cassette, lauréat du Prix LNE de la recherche 2016

Créé en 2009, le Prix LNE de la recherche vise à récompenser les chercheurs contribuant à la réussite et à la réputation scientifique du Réseau national de la métrologie française qu'il pilote et de sa propre activité de recherche.

Cette huitième édition a mis à l'honneur Philippe Cassette. Docteur en physicochimie depuis 1981, il est entré au LNE-LNHB en 1991, après avoir été responsable du laboratoire d'étude des transferts de contamination dans les installations nucléaires, à l'Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire (IPSN, devenu une entité de l'IRSN).

Au LNE-LNHB, il a d'abord pris la responsabilité des mesures primaires d'activité par les méthodes utilisant la scintillation liquide, alors en plein développement. Au fil du temps, il a pris en charge la responsabilité d'autres techniques de mesure du laboratoire : mesures primaires et secondaires de gaz radioactifs (compteurs proportionnels différentiels), mesures primaires et secondaires de radon et de thoron, mesures de débit d'émission de sources de neutrons (méthode du bain de manganèse), en apportant des avancées significatives dans le développement des instrumentations et des méthodes de mesure associées. Ces progrès ont contribué aux bons résultats du LNE-LNHB dans les comparaisons internationales de mesures d'activité et dans le rayonnement scientifique du laboratoire au niveau international.

Son expertise dans le domaine de la métrologie des rayonnements ionisants a été reconnue en interne par le CEA avec sa nomination d'abord en tant qu'expert senior en 2004, puis en tant qu'expert international en 2009. Il a également obtenu la très large reconnaissance de ses pairs au niveau international, au travers de nombreuses missions d'expertise (entre autres pour l'AIEA) : ANSTO (Australie), CNEA (Argentine), IFIN (Roumanie), LNMRI

(Brésil), NIM (Chine), NIST (USA), NPL (UK), RC (Pologne), CENTIS (Cuba) et SMU (Slovaquie), et au travers de nombreuses coopérations sur le développement de compteurs à scintillation liquide et l'accueil de collaborateurs provenant de différents instituts étrangers. Il a été coordinateur du GT Scintillation liquide de l'International Committee for Radionuclide Metrology (ICRM). Il est membre du comité scientifique des conférences ICRM depuis 1997 et membre du comité scientifique des conférences Advances in Liquid Spectrometry depuis 2001. Dans le cadre du programme européen de recherche en métrologie, il a été leader d'un workpackage du projet MetroFission. Il est l'auteur ou co-auteur d'environ 80 articles, dont plus de 70 dans des revues à comité de lecture dans le domaine de la métrologie de la radioactivité.

Ayant obtenu son HDR (Université Paris Sud) en 2008, il a encadré 9 thèses (dont 4 d'universités étrangères) et 3 formations d'ingénieur. Il donne des cours à l'INSTN, à l'université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand et à l'université Paris VII ainsi que dans plusieurs instituts étrangers.

Philippe Cassette a apporté une contribution majeure au rayonnement international du LNE-LNHB, et donc de la métrologie française, par la qualité de ses travaux scientifiques et les nombreuses collaborations qu'il a initiées.





LA RECHERCHE AU
LNE EN 2016, C'EST :

25 %

du budget
global du LNE

75

projets de recherche

90

publications
dans des revues
à comités de lecture

15

doctorants et près

de **180** docteurs
et ingénieurs

Un portefeuille

de **13** brevets



LA RECHERCHE DU
RÉSEAU NATIONAL
DE LA MÉTROLOGIE
FRANÇAISE EN 2016,
C'EST :

115

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

190

publications
dans des revues
à comités de lecture

325

communications

64

thèses en cours



LA RECHERCHE AU SERVICE DU CITOYEN



DIAGNOSTIC ALZHEIMER

VERS UN MEILLEUR DOSAGE DES BIOMARQUEURS DE LA MALADIE

La maladie d'Alzheimer représente un enjeu de santé publique majeur, et la détection y occupe une place clé. Le dosage de certains biomarqueurs pourrait permettre d'effectuer un diagnostic précoce et différentiel. Mais il faut rendre les analyses comparables d'une plateforme analytique à une autre afin qu'elles soient plus fiables. C'est l'objet des travaux menés par les experts du LNE en métrologie pour la biologie.

Avec 860 000 personnes âgées de plus de 65 ans atteintes (selon l'OPEPS, Office parlementaire d'évaluation des politiques de santé), la maladie d'Alzheimer est au premier rang des maladies neurodégénératives en France, et constitue un enjeu de santé publique majeur. Cette pathologie sévère met en jeu des facteurs variés, environnementaux ou génétiques.

Dans de nombreux cas, le diagnostic est trop tardif et les techniques actuelles manquent encore de fiabilité, ce qui compromet la prise en charge des patients et l'évaluation de nouvelles stratégies thérapeutiques.

DES MÉTHODES DE RÉFÉRENCE POUR LE DOSAGE DE BIOMARQUEURS

Une solution réside dans le dosage de certains biomarqueurs de la maladie pour effectuer un diagnostic précoce et différentiel. Car la maladie se caractérise par des modifications cérébrales dont certaines peuvent être mesurées grâce à ces indicateurs.

Mais il est nécessaire d'établir une traçabilité des mesures et donc de « raccorder » les résultats de ces dosages aux unités du système international (SI), selon la terminologie des spécialistes de la métrologie. Et ce, « *afin, comme pour toutes autres mesures, qu'elles soient comparables d'une plateforme analytique à une autre, et donc plus fiables* », détaille Vincent Delatour, expert en biomarqueurs à la direction de la métrologie scientifique et industrielle du LNE.

C'est l'objectif du projet « Développement et validation de méthodes de référence par spectrométrie de masse pour le dosage de biomarqueurs de la maladie d'Alzheimer », mené, de 2013 à 2016, par les équipes du LNE et du CHU de Montpellier. Précisément, les chercheurs ont pu développer des méthodes de dosage de biomarqueurs de la maladie, en particulier par le dosage des peptides bêta-amyloïdes et de la protéine TAU (deux substances caractéristiques d'Alzheimer), dans le liquide céphalo-rachidien.

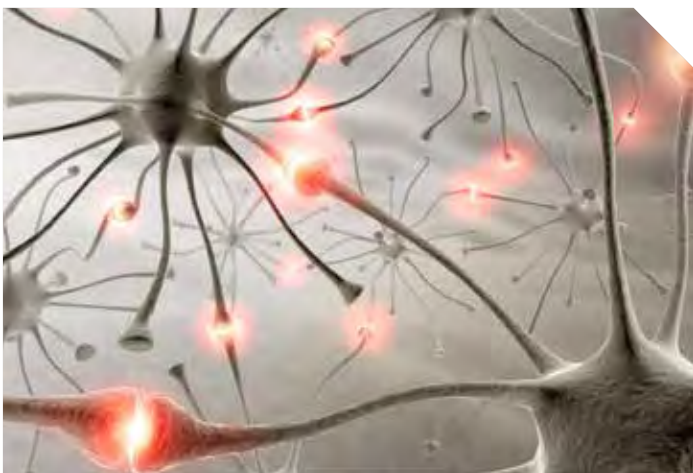
Une détection plus précoce de la maladie d'Alzheimer est possible par un meilleur dosage des biomarqueurs de la maladie. "

Vincent Delatour, expert en biomarqueurs au LNE - Pôle Chimie et Biologie.

DES ANALYSES DE LABORATOIRES PLUS FIABLES

Ces méthodes s'appuient sur la détection par spectrométrie de masse. Après avoir optimisé les paramètres liés au spectromètre, les paramètres chromatographiques ont pu aussi être optimisés, de même que les différentes étapes de la préparation d'échantillons.

Les travaux du LNE constituent une avancée majeure, car jusqu'ici la méthode par dosage était bien employée mais elle présentait des problèmes de comparabilité d'un laboratoire à l'autre. Désormais, le LNE est capable d'étalonner des méthodes de routine et des kits de dosages d'une grande fiabilité pour obtenir des mesures comparables entre laboratoires. « *Les analyses se révèlent donc plus fiables pour le médecin* »...



Ce qu'il faut retenir

Le projet a permis de développer des méthodes de référence basées sur l'utilisation de la spectrométrie de masse pour différents biomarqueurs de la maladie d'Alzheimer.

MESURE DE LA PUISSANCE ACOUSTIQUE UN NOUVEL ÉTALON PLUS FIABLE POUR LE BRUIT

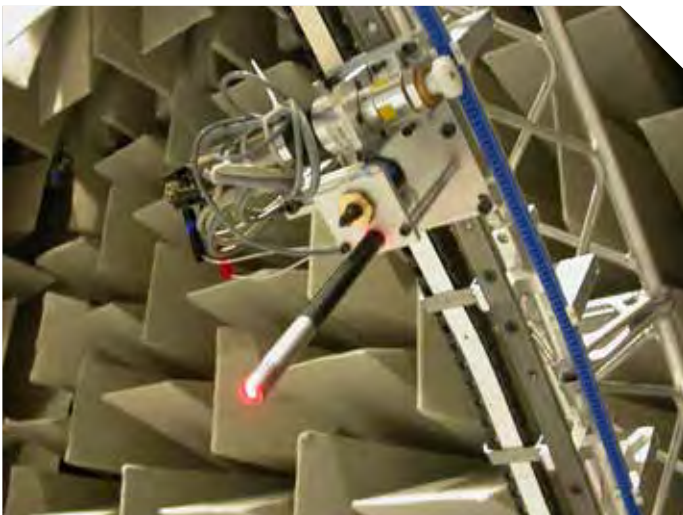
Comment mieux lutter face à la pollution sonore ? Que ce soit pour le grand public ou dans un cadre professionnel, la mesure des niveaux de bruit des appareils qui nous entourent et des machines industrielles doit être mieux caractérisée. Le LNE y contribue avec de nouveaux étalons.

Pour mieux protéger les usagers dans leur quotidien et les professionnels sur leur lieu de travail, les fabricants d'appareils grand public (comme l'électroménager par exemple) ou de machines pour l'industrie, doivent déclarer les niveaux sonores produits en conditions d'utilisation. La puissance acoustique est l'indicateur de référence utilisé pour mesurer et comparer le bruit fait par des produits différents. Mesurée en dB (décibels), cette caractéristique est exigée par plusieurs directives européennes.

DES MESURES QUI NE SONT PAS ASSEZ COMPARABLES

Certes, on dispose déjà d'outils et de méthodes pour mesurer cette puissance acoustique, mais des outils qui ne mesurent pas forcément la même chose. Ces différentes méthodes génèrent des biais : lorsqu'on mesure par exemple la pression acoustique, il est nécessaire, pour en déduire la puissance, de faire des hypothèses sur le champ acoustique et l'environnement d'essai.

« *Les incertitudes de mesures freinent l'indispensable comparabilité des produits mis sur le marché* », explique Patrick Cellard, responsable technique des essais acoustiques au LNE-LCM.



Système automatisé de mesure de la pression acoustique du LNE, vue de détail.

DE NOUVEAUX ÉTALONS POUR AMÉLIORER LA MESURE DU BRUIT

Le projet européen « Réalisation, dissémination et utilisation de l'unité de puissance acoustique des bruits aériens », dans lequel le LNE a été impliqué de 2014 à 2016 aux côtés de la PTB (le laboratoire de métrologie allemand Physikalisch-Technische Bundesanstalt) et d'autres laboratoires européens, a donné lieu à une source de référence primaire « *permettant de disséminer de façon fiable l'unité de puissance acoustique à travers des étalons de transfert* », explique-t-on au LNE. Il devrait aussi favoriser la définition de nouvelles normes sur la mesure de la puissance acoustique.

Concrètement, les chercheurs ont conçu un étalon sous forme d'une source de bruit constituée d'un piston émettant un champ sonore calculable si le déplacement du piston est connu, mesuré par interférométrie laser. Ce champ acoustique est aussi mesuré et la comparaison avec le champ calculé fournit une correction applicable ensuite aux mesures des étalons secondaires, dits de transfert, qui sont eux déplaçables dans les environnements d'essais réels de machines. La contribution essentielle du LNE-LCM réside dans la conception, le développement et l'utilisation d'un système automatisé de mesure de la pression acoustique, composé d'une enveloppe hémisphérique d'un rayon de deux mètres, et comprenant en son centre les sources à étalonner. Le projet devrait permettre aux fabricants de rendre leurs produits vraiment comparables sur ce plan.

Le projet est terminé, mais le travail se poursuit par des comparaisons inter-laboratoires entre différents instituts de métrologie en Europe.

Les incertitudes de mesures freinent l'indispensable comparabilité des produits mis sur le marché

Patrick Cellard, responsable technique des essais acoustiques au LNE-LCM.

Ce qu'il faut retenir

L'objectif du projet est de développer et caractériser une source sonore servant d'étalon primaire, puis de la « disséminer » vers l'industrie, via des étalons dits de transfert, afin de mieux mesurer le bruit des produits avant leur mise sur le marché.

VERS UNE RADIOTHÉRAPIE STÉRÉOTAXIQUE PLUS PRÉCISE UN DOSIMÈTRE INNOVANT POUR UNE MEILLEURE MAÎTRISE DE LA DOSE DÉLIVRÉE AU PATIENT

Le LNE-LNHB réalise un dosimètre adapté aux nouveaux appareils de radiothérapie délivrant des faisceaux de très petite section. Ces derniers servent à irradier les tumeurs de façon précise, sans toucher les tissus sains. Un travail d'étalonnage très innovant dans le domaine de la santé de pointe.

En matière de traitement contre le cancer, la radiothérapie connaît de fortes évolutions. Ainsi, depuis une quinzaine d'années, les industriels du secteur ont développé de nouveaux appareils de radiothérapie ayant comme particularité de délivrer des faisceaux de très petite section, c'est-à-dire d'à peine quelques millimètres de section. L'intérêt est de pouvoir irradier une tumeur très précisément, et parfois sous différents angles, tout en épargnant les tissus sains.

Or, les protocoles internationaux d'étalonnage des appareils de radiothérapie utilisés dans les services hospitaliers n'ont pas suivi cette évolution : ils ne sont plus adaptés aux conditions géométriques d'irradiation à de telles précisions. De même, les dosimètres utilisés ne sont plus irradiés de façon homogène car leurs dimensions sont proches (voire plus grandes parfois) de la section du faisceau d'irradiation lui-même.

NOUVEAU PROTOCOLE D'ÉTALONNAGE

« Les médecins médicaux sont démunis pour l'étalonnage de ces faisceaux de radiothérapie de très petite section », constate Marie-Noëlle Amiot, chercheuse au Laboratoire de métrologie de la dose du LNE-LNHB (CEA).

Le laboratoire, avec une équipe de l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire), a très vite engagé

la conception de dosimètres spécifiques pour permettre aux services de radiothérapie de bien vérifier les doses délivrées aux patients dans ces conditions et dans le cadre d'une traçabilité métrologique rigoureuse. « *Objectif : améliorer l'efficacité des soins* ».

MINI-DOSIMÈTRE POUR FAISCEAUX DE PRÉCISION

Dans ce cadre, le projet intitulé « Développement et validation d'un nouveau dosimètre RPE [résonance paramagnétique électronique] pour son application dans les petits champs », et mené de 2014 à 2016, consiste à développer des mini-dosimètres adaptés aux faisceaux de petite section.

Le LNE-LNHB a créé un dosimètre de diamètre interne de 1 mm, en travaillant notamment sur sa forme et sa géométrie. Les chercheurs ont réalisé un conteneur pour la poudre d'alanine (le matériau radiosensible lu après irradiation par RPE) : l'innovation réside dans l'assemblage conteneur/matériau sensible. L'ensemble peut être lu directement, le conteneur ne présentant pas de signal RPE. Ce dosimètre à l'alanine est très différent des pastilles d'alanine compactées utilisées jusqu'à présent. Les performances ont été mesurées et des courbes d'étalonnage tracées.

Résultat : un mini-dosimètre peu coûteux, adapté aux faisceaux de radiothérapie de petite section, facile à mettre en œuvre et doté d'une bonne linéarité. Il reste à l'améliorer avant de généraliser son usage en radiothérapie, notamment en augmentant sa sensibilité.

Spectromètre RPE ELexsys au LNE-LNHB.



Les services de radiothérapie ont besoin de faisceaux de très petite section bien caractérisés. Objectif : améliorer l'efficacité des soins. "

Marie-Noëlle AMIOT, chercheuse au Laboratoire de métrologie de la dose du LNE-LNHB (CEA).

Ce qu'il faut retenir

Un brevet a été déposé concernant ce projet. L'innovation réside dans l'assemblage conteneur/matériau sensible sous une forme physique différente de celle retenue jusqu'à présent. Cette nouveauté permet la réalisation de dosimètres de très petite taille et de forme modulable.

RADIOTHÉRAPIE DE CONTACT : UNE RÉFÉRENCE INDÉPENDANTE DE CELLE DES CONSTRUCTEURS POUR DOSER LES RAYONS X

Économique pour la collectivité et plus confortable pour le patient, la radiothérapie de contact, avec rayons X, est utilisée en France dans le traitement de certains cancers en recherche clinique. Mais les physiciens d'hôpitaux ne disposent que des données d'étalonnage des doses établies par les constructeurs des appareils de radiothérapie. En réponse à leur besoin, le LNE-LNHB développe un protocole d'étalonnage indépendant.

Le traitement de certains cancers nécessite des progrès continus en matière de radiothérapie. La radiothérapie dite de contact vit un sort particulier. Née dans les années 1930, puis délaissée au profit de la radiothérapie externe et de la curiethérapie conventionnelle, elle connaît aujourd'hui un regain d'intérêt de la part des cliniciens. Elle consiste à utiliser des rayons X au contact direct de la zone à traiter, pour soigner par exemple des cancers de la peau ou du sein.

COMMENT OBTENIR DES MESURES INDÉPENDANTES ?

Comme sources de rayonnement, on utilise ici des générateurs de rayons X miniaturisés qui sont, suivant le cancer à traiter, associés à différents applicateurs afin d'émettre un faisceau adapté. Économique et plus confortable pour le patient que d'autres techniques, notamment pour le traitement du cancer du sein, la radiothérapie de contact est largement soutenue par l'Institut national du cancer. Cependant, pour délivrer la dose prescrite, les physiciens médicaux français ont aujourd'hui pour seule possibilité d'utiliser les abaques de distribution de dose absorbée dans l'eau fournis par l'entreprise Zeiss : dix centres en France sont actuellement dotés de son appareil. Comment obtenir des mesures indépendantes, seules garantes d'une stricte comparabilité entre appareils et traçables sur le plan métrologique selon le vocabulaire des spécialistes ?

UN NOUVEAU PROTOCOLE DE DOSAGE

Un certain nombre d'équipes de physique médicale expriment, de plus en plus, cette exigence de données indépendantes auprès des chercheurs en métrologie : « *Ils ont besoin d'une référence dosimétrique indépendante de celle du constructeur, d'une confirmation de la validité des abaques fournis par ce dernier et d'un suivi métrologique de leur appareil* », précise Isabelle Aubineau-Lanièce, ingénieure-chercheuse au Laboratoire de métrologie de la dose du LNE-LNHB (CEA). C'est l'objet du programme « Références en K_{air} (kerma dans l'air) et D_{eau} (dose dans l'eau) pour les faisceaux de photons X d'énergie inférieure à 50 keV utilisés en radiothérapie de contact » mené par le LNE-LNHB depuis 2015. Le laboratoire a pu reproduire à l'identique les faisceaux X émis par l'Intrabeam au sein de son laboratoire à l'aide de générateurs X conventionnels, et travailler sur l'établissement de références dosimétriques définies respectivement dans l'air et dans l'eau (rappelons que le corps humain est à 80 % composé d'eau).

Un protocole de dosimétrie a été établi pour obtenir des abaques de distribution de dose absorbée dans l'eau. Il repose sur l'utilisation combinée de ces références et de mesures de distribution de dose volumique (3D). Celles-ci doivent être réalisées à l'aide d'un gel dosimétrique lu par IRM (imagerie par résonance magnétique). L'étalonnage de ce gel est en cours. Objectif : confirmer les bases de données du constructeur à l'aide d'une cartographie des doses sous forme de distribution spatiale. Rendez-vous pour cela fin 2017...

Les physiciens médicaux ont besoin d'une référence dosimétrique indépendante de celle des constructeurs et d'un suivi métrologique de leurs appareils de radiothérapie X. "

Isabelle Aubineau-Lanièce, ingénieure-chercheuse au Laboratoire de métrologie de la dose du LNE-LNHB (CEA).



Etude de l'influence de l'irradiation avec l'INTRABEAM sur les propriétés du gel dosimétrique.

Ce qu'il faut retenir

Pour délivrer la bonne prescription en rayons X en radiothérapie de contact, les physiciens médicaux ont aujourd'hui pour seule possibilité d'utiliser les abaques de distribution de dose absorbée fournis par le constructeur : le projet du LNE-LNHB vise à leur fournir un étalonnage des doses indépendant de ces données.

NANOPARTICULES ET SANTÉ PUBLIQUE : MIEUX CARACTÉRISER L'IMPACT SUR LES FONCTIONS CÉRÉBRALES DES NANO-OBJETS ÉMIS LORS DE L'ABRASION MÉCANIQUE DE PEINTURES PHOTO-CATALYTIQUES

Enjeu de santé majeur lié à la pollution atmosphérique, le relargage dans l'air ambiant de nanoparticules fait l'objet de travaux couplés entre le LNE, le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), l'Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES Lyon) et le laboratoire CarMeN à Lyon. Comment caractériser l'impact neurotoxique des nanoparticules de dioxyde de titane émises lors de l'abrasion mécanique de peinture photo-catalytique ?

Le marché des nanocomposites contenant du dioxyde de titane (TiO₂) ne cesse de croître. De tels produits dits « nano-additifs » concernent, entre autres, le domaine du bâtiment et plus particulièrement les peintures. Mais la démocratisation de ces matériaux « high-tech » soulève de nombreuses questions : comment évoluent-ils dans le temps ? Quel est l'impact sur l'environnement et sur la santé humaine ?... Au point qu'en mars 2016, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé le TiO₂ dans la liste des substances potentiellement cancérogènes pour l'homme.

Le risque lié à la santé au travail et dans le cadre d'un usage domestique est donc bien réel. Dans un contexte où de nombreuses questions restent sans réponse quant aux facteurs déterminant et favorisant l'apparition chez l'homme de maladies neurodégénératives, dont l'importance en santé publique ne cesse de croître, et dans un contexte d'exposition croissante aux nanomatériaux, il y a un besoin urgent de proposer une approche expérimentale qui pourrait aider à identifier les effets neurotoxiques possibles de nano-objets avant qu'ils ne deviennent potentiellement un problème de santé publique plus conséquent dans notre société.

MONA : une plateforme du LNE dédiée à la caractérisation métrologique des nano-objets sous forme d'aérosols

Cette plateforme, dédiée à la caractérisation métrologique des nano-aérosols, a pour objectif d'assurer la traçabilité des mesures particulières en phase aérosol au système international d'unités (SI). Des protocoles de génération d'aérosols de référence, de prélèvement et de préparation d'échantillons y sont développés. Les moyens de mesure en temps réel et a posteriori de cette plateforme permettent également le développement de procédures de caractérisation en taille et de mesures de pulvéulence de poudres nano-structurées.

De nombreuses questions se posent concernant l'utilisation croissante de nanoparticules et les impacts sanitaires associés, notamment concernant leur neurotoxicité. ”

François Gaie-Levrel, ingénieur-chercheur au LNE - Laboratoire de métrologie des aérosols - Plateforme MONA.

ÉTUDE DE L'IMPACT DES NANO-OBJETS SOUS FORME D'AÉROSOLS SUR LES FONCTIONS CÉRÉBRALES

Dans ce contexte, le projet « Release_NanoTox » (financement ANSES pour 2015-2018) vise à apporter, par une approche réaliste, des connaissances nouvelles concernant l'impact potentiel des nano-objets issus de matériaux nanocomposites sous contrainte d'usage, sur les fonctions cérébrales. « *L'impact toxicologique in vivo sur les fonctions cérébrales associé à l'inhalation d'un aérosol est encore trop peu étudié* », précise-t-on au LNE. Pour ce faire, et dans le contexte de ce projet, les équipes scientifiques ont développé un banc expérimental permettant de réaliser une exposition réaliste à partir de nanoparticules de TiO₂ issues du ponçage de matériaux nanoadditifs. Le CSTB et le LNE - Plateforme MONA (voir l'encadré ci-contre) ont participé à la phase de caractérisation aéraulique de ce banc et à la caractérisation physico-chimique des nano-objets émis dans la chambre d'exposition. Puis l'ANSES et le laboratoire CarMeN ont été impliqués pour les phases d'exposition par inhalation et d'analyse in vivo des altérations morphofonctionnelles cérébrales des souris au cours de l'exposition. Les premiers résultats sont en cours d'exploitation.



Banc d'abrasion mécanique couplé à une chambre d'exposition par inhalation (Anses).



LA RECHERCHE POUR L'INDUSTRIE



MESURE DE COUPLES DE NOUVEAUX BANCS D'ÉTALONNAGE POUR UNE MEILLEURE PRÉCISION

Dans le domaine de la mesure des couples, les bancs d'étalonnage actuels, de conception ancienne, présentent des incertitudes qui ne répondent plus aux exigences de précision de l'industrie mécanique. Le LNE-LCM a développé un ensemble de nouveaux bancs qui améliorent les mesures.

L'enjeu est important : il s'agit d'effectuer un meilleur étalonnage des instruments de mesure, dans le domaine de la métrologie des couples au service de l'industrie mécanique. On peut définir le « couple » comme un effort de torsion autour d'un axe. Il s'agit pour l'industrie de maîtriser les nombreux assemblages vissés critiques (fixation sans rupture, garantie d'étanchéité...) ou de maîtriser les mesures de puissance mécanique et de rendement (moteur, turbine...), touchant ainsi de nombreux secteurs industriels de pointe : nucléaire, aéronautique, automobile, ferroviaire, maritime, défense.

Pour ce faire, les industriels utilisent des clés dynamométriques étalonnées à l'aide d'instruments appelés couplemètres. Pour répondre aux exigences d'assurance de la qualité et garantir la justesse de ces couplemètres, il y a lieu de les étalonner, c'est-à-dire de les comparer à un étalon avec une incertitude maîtrisée. C'est la fonction des bancs d'étalonnage de couple.

Or les bancs d'étalonnage actuels, composés d'un bras de levier et d'un palier à billes, sont de conception ancienne, et affichent « *des incertitudes de mesure qui ne répondent plus aux besoins de précisions de mesure de l'industrie* », explique Philippe Averlant, Responsable du Département Force et grandeurs associées au LNE.

DE MEILLEURES INCERTITUDES SUR LES COUPLES ÉTALONS

Dans cette perspective, le LNE-LCM, qui travaille sur le sujet depuis les années 2000, développe de nouveaux bancs de référence avec une spécificité technique : l'utilisation de paliers à air pour réduire les frottements.

Pour satisfaire les besoins, deux bancs à masses suspendues et bras de levier sont nécessaires. Le premier, d'une capacité de 50 N.m a été mis en service en 2011, avec une extension à 5 N.m, trois ans plus tard. Réduisant ainsi les incertitudes d'un facteur cinq.

Quant au second banc, d'une capacité de 5 kN.m, il a vu le jour en 2016, suite notamment à une comparaison inter-laboratoires au niveau international. Son extension à 500 N.m est attendue pour 2018. Pour ce faire, des solutions techniques spécifiques et innovantes ont été développées : bras avec structures dissociées (une pour la transmission des efforts, l'autre pour le positionnement géométrique), paliers à air utilisant des matériaux poreux (pour une meilleure répartition de la pression) et système de fixation des clinquants (pour éviter leur plissement).

« *Un gain sur les incertitudes d'un facteur quatre est confirmé. De quoi non seulement répondre aux besoins de l'industrie, mais également de replacer le LNE-LCM parmi les principaux laboratoires de référence en métrologie des couples au niveau international* », conclut Philippe Averlant.



Montage d'un couplemètre dans le nouveau banc LNE-LCM de référence de couple de 5 kN.m.

Ce qu'il faut retenir

La qualification métrologique a permis de valider des choix technologiques innovants pour développer les bancs d'étalonnage de couple du futur.

L'industrie mécanique a besoin de bancs de mesure de couples plus adaptés, couvrant les nouveaux besoins de précision.

Philippe Averlant, Responsable du Département Force et grandeurs associées au LNE.

HAUTE TENSION

MESURER AVEC PLUS DE PRÉCISION LES TRANSFORMATEURS DE NOUVELLE GÉNÉRATION

Pour optimiser leur consommation, certaines industries utilisatrices de haute tension souhaitent connaître avec la meilleure exactitude possible les valeurs fournies. Le LNE développe une méthode qui permettra d'améliorer les incertitudes pour s'adapter aux nouvelles classes de transformateurs en haute tension.

L'incertitude de mesure dans les installations à haute tension peut avoir des conséquences économiques importantes. Ainsi, sur une plateforme de production d'électricité de 750 MW, une erreur de 0,1 % sur la mesure de la tension de 400 kV implique un écart de 0,75 MW, soit l'électricité nécessaire pour alimenter 220 foyers !

Les fabricants de transformateurs de tension travaillent constamment à réduire les erreurs afin de les rendre négligeables. « *La qualification et l'étalonnage d'un transformateur nécessitent la disposition de méthodes offrant des incertitudes meilleures que les erreurs annoncées par ces fabricants* », explique Mohamed Agazar, chef de projet au LNE.

UN ÉTALONNAGE COMPLEXE

La tâche n'est pas facile. Pour caractériser un transformateur de tension, deux grandeurs sont mesurées : l'erreur de rapport (le rapport de transformation indiqué sur la plaque signalétique du transformateur) et le déphasage entre sa tension d'entrée et sa tension de sortie. Pour pouvoir mesurer ces deux grandeurs, le transformateur à caractériser est comparé à un dispositif étalon. Ce dernier est composé soit d'un autre transformateur de mesure, soit d'un diviseur résistif ou capacitif.

Toutefois, l'étalonnage dans les laboratoires de métrologie est difficilement réalisable à cause du volume et du poids des transformateurs et, d'autre part, ces laboratoires sont confrontés aux problèmes liés à la multitude de rapports à étalonner.

Nous avons besoin d'un système capable de mesurer les transformateurs de haute tension sur site, et en utilisant un seul étalon.

Mohamed Agazar, chef de projet au LNE -
Pôle Métrologie Électrique.

AMÉLIORATION DES INCERTITUDES D'UN FACTEUR 3 À 10

Pour ce faire, le projet « Développement d'un système de mesure par échantillonnage pour la mesure de haute tension » a été mené par le LNE de 2013 à 2016.

Le laboratoire a mis en œuvre une nouvelle méthode d'étalonnage en réalisant un nouveau banc de référence automatisé. Celui-ci sera utilisable sur site et permettra d'assurer une fiabilité améliorée des résultats, une simplification du processus de mesure et une amélioration des capacités d'étalonnage. Le point essentiel est une amélioration importante des incertitudes de mesure, d'un facteur 3 à 10 selon les appareils étalonnés.



Laboratoire de métrologie électrique Haute Tension du LNE.

Ce qu'il faut retenir

La méthode du LNE permet d'améliorer les incertitudes et de s'adapter aux nouvelles classes de transformateurs en haute tension. Elle pourra à terme être mise en œuvre sur les sites d'exploitation de ces transformateurs.

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE DE NOUVELLES MÉTHODES DE MESURE CEM AU SERVICE DE L'INDUSTRIE

La compatibilité électromagnétique des appareils électriques ou électroniques entre eux est un enjeu important de l'industrie, notamment dans l'électroménager. Elle répond à des normes strictes. Le LNE travaille à une meilleure qualification des appareils.

Hifi, électroménager, vidéo mais aussi appareils industriels comme les générateurs ou certains moteurs, les produits électriques et électroniques doivent répondre à des normes européennes strictes en termes de compatibilité électromagnétique (CEM). Pourquoi ? Pour mieux mesurer les éventuelles perturbations radioélectriques entre appareils électroménagers. Cette notion de CEM peut être décrite comme la faculté d'un système électrique ou électronique à ne pas entraîner lui-même de perturbations électromagnétiques gênantes pour son environnement.

DES MOYENS DE MESURE COÛTEUX

Pour respecter cette conformité, il faut mesurer et qualifier les appareils concernés. Or le développement et la maintenance de moyens de mesure dits CEM se révèlent coûteux pour l'industrie. Reste donc à utiliser ceux des laboratoires d'essais et de métrologie. Mais réaliser les tests chez l'industriel est souvent complexe : problèmes d'adaptation à l'environnement industriel (nuisances sonores, manque d'espace...), coûts financiers, exigence de disponibilités, et impossibilité de déplacer certains appareils en essai ou de grande taille dans les laboratoires. « *Des méthodes adaptées et des procédures sont donc nécessaires pour soutenir l'industrie et permettre aux produits développés de répondre aux normes CEM* », insiste François Ziadé, ingénieur-chercheur au LNE. Il est également nécessaire de valider les méthodes de mesures CEM utilisées pendant toute la période de développement de ces produits. « *Les laboratoires de métrologie sont indispensables pour garantir les processus de mesures utilisés et statuer sur la conformité des produits développés par les industriels* » complète François Ziadé.

UN NOUVEL ADAPTATEUR POUR DES ESSAIS CEM

Avec le projet européen « *Improved EMC test methods in industrial environments* » (2013-2016), le LNE a travaillé sur de nouvelles méthodes dites « d'essais de propagation conduits et rayonnés », pour étudier les couplages électriques parasites entre appareils électroménagers. Ces recherches ont permis d'établir et d'améliorer la traçabilité métrologique d'équipements CEM.

Pour cela, le LNE a réalisé un adaptateur pour l'étalonnage de certains instruments de mesure CEM appelés RSIL (réseaux de stabilisation d'impédance de ligne). Cet adaptateur, complètement modélisé, permet de corriger de façon automatique l'erreur sur les paramètres d'étalonnage des RSIL. Les résultats obtenus ont été communiqués aux organisations de normalisation française (AFNOR) et internationale (IEC). Un groupe de travail, auquel le LNE participe, a été créé au sein de l'IEC pour prendre en compte ces résultats scientifiques et procéder le cas échéant à une révision de la norme actuelle sur les méthodes d'étalonnage des appareils de mesure des perturbations radioélectriques.

Adaptateur calculable développé pendant le projet européen: adaptateur connecté au câble de mesure du VNA avant étalonnage d'un RSIL



Ce qu'il faut retenir

Le projet européen permet de garantir la traçabilité, et d'améliorer les méthodes d'essais de compatibilité électromagnétique pour mieux mesurer les perturbations radioélectriques entre appareils électroménagers.

Il faut proposer des méthodes de mesure adaptées et de nouvelles procédures en métrologie pour soutenir l'industrie et lui permettre de développer des produits répondant parfaitement aux normes européennes de compatibilité électromagnétique. ”

François Ziadé, ingénieur-chercheur au LNE - Pôle Métrologie Électrique.

MESURE DE RAYONNEMENTS

SPECTRO-RADIOMÈTRES : DES MESURES TOUJOURS AUSSI FIABLES, MAIS MOINS COÛTEUSES



Les domaines d'application de la spectro-radiométrie sont nombreux et devraient se développer dans l'avenir. La mise au point par le LNE-LCM d'une nouvelle technique d'étalonnage fiable et précise, avec un coût maîtrisé, permet d'accompagner ce développement.

Industrie, santé, sécurité des personnes... les spectro-radiomètres sont de plus en plus utilisés. Il s'agit d'instruments mesurant la puissance d'un flux de rayonnement électromagnétique en fonction de la longueur d'onde. Parmi eux, on trouve des spectro-radiomètres dits à détecteur matriciel : ils peuvent couvrir en une seule mesure, en fonction de leur résolution spectrale, un domaine plus ou moins large de longueurs d'onde.

Avantages : ils sont compacts, robustes et rapides. Ils permettent la mesure du spectre de rayonnement d'une source, en particulier les sources impulsionnelles, élargissant encore les domaines d'application.

Ce qu'il faut retenir

Le projet a pour but de mettre en œuvre une technique de mesure (sous accréditation COFRAC) pour l'étalonnage et la caractérisation d'un spectro-radiomètre, utilisant des moyens techniques économiques mais donnant des résultats fiables pour l'utilisateur.

DES USAGES TRÈS LARGES

Ainsi, parmi les champs couverts, la mise en œuvre de la directive européenne ROA (rayonnements optiques artificiels) va nécessiter d'évaluer le niveau de risque encouru par les travailleurs en raison d'un rayonnement optique présent dans leur environnement professionnel. On citera aussi le contrôle des cabines de bronzage qui doit obligatoirement être réalisé à l'aide d'un spectro-radiomètre à détecteur matriciel. Ou encore le contrôle non-destructif, ainsi que la qualification des éclairages sachant que les nouvelles sources d'éclairage à LED nécessitent une caractérisation spatiale de l'intensité lumineuse et une analyse colorimétrique pour évaluer la qualité de l'éclairage.

Cependant, ces spectro-radiomètres (fondés sur un monochromateur simple) présentent un taux de lumière parasite important, ce qui peut impacter la précision des mesures. « *Un travail de métrologie spécifique est nécessaire* », expliquent Thierry Valin, chef de projet, et Jimmy Dubard, responsable de l'équipe photonique, au LNE-LCM et précise : « *Le besoin de traçabilité est crucial compte tenu de l'accroissement des domaines d'application.* »

DES MONOCHROMATEURS ET DES LASERS

Il existe des moyens de réduire la contribution de la lumière parasite en apportant une correction basée sur une technique de laser accordable. Une démarche coûteuse. Avec le projet « Procédure d'étalonnage des spectro-radiomètres à détecteur matriciel incluant la correction de lumière parasite », (2015-2016), le LNE-LCM obtient un résultat équivalent mais plus économique en utilisant une source accordable construite avec un monochromateur et quelques sources laser. Cette caractérisation complète l'étalonnage réalisé sur un large domaine spectral compris entre 200 nm et 2 500 nm.

À la clé : « *Un étalonnage et une caractérisation de la lumière parasite qui sont exploités par un logiciel dédié permettant de fournir une mesure fiable à l'utilisateur du spectro-radiomètre* », conclut Thierry Valin.

Le besoin de traçabilité des spectro-radiomètres est crucial. Il fallait définir une nouvelle procédure d'étalonnage peu coûteuse permettant de démocratiser les moyens de réaliser des mesures fiables. ”

Thierry Valin, technicien de recherche au LNE-LCM.

RÉFLECTOMÉTRIE MULTIDIMENSIONNELLE COMPRENDRE LE BRILLANT POUR MIEUX LE MESURER

Le brillant est un attribut visuel reconnu comme étant le plus important, après la couleur, lorsqu'il s'agit de choisir un objet. La mesure actuelle est trop sommaire pour caractériser la plupart des nouvelles surfaces générées par l'industrie. Le LNE-LCM a développé un équipement permettant de franchir un cap dans la mesure du brillant.

Les objets qui ont des formes identiques sont identifiés grâce aux attributs visuels de surfaces. Ces attributs sont la couleur, le brillant, la texture et la transparence. Combinés à l'expérience visuelle, ils permettent la reconnaissance des surfaces et font naître le concept d'apparence de l'objet. Et d'énormes efforts sont consentis par les industriels, avec en tête l'industrie automobile et les cosmétiques, pour proposer de nouveaux effets visuels, toujours plus sophistiqués, comme par exemple les effets pailletés, nacrés ou goniochromatiques.

UNE NOTION TRÈS COMPLEXE

Il existe désormais un réel retard métrologique concernant la notion de brillant : comment définir le mesurande ? comment améliorer sa mesure ? comment la rendre plus traçable ? Car, à l'heure actuelle, le brillancemètre ne permet d'effectuer qu'une seule mesure. Cette unique valeur se trouve être un rapport entre un flux réfléchi par l'objet et celui d'un étalon : « *Cela ne tient pas compte d'autres éléments comme la couleur ou le contexte lumineux* », explique Gaël Obein. « *C'est limité, et il est difficile de faire des comparaisons d'un matériau à l'autre.* » Les travaux du LNE-LCM/CNAM au sein du projet européen EURAMET « Réflectométrie multidimensionnelle pour l'industrie », appelé xDReflect, montrent que le brillant est une notion beaucoup plus complexe que ce que l'on avait coutume de penser pour ce qui est de sa nature : il est difficile à mesurer car il dépend du matériau.

xDReflect a pour objectif de faire progresser la métrologie primaire dans le domaine de la caractérisation des matériaux, afin de produire de nouveaux protocoles de mesure et de nouveaux étalons qui permettront aux industriels de mieux contrôler l'apparence visuelle des surfaces qu'ils produisent aujourd'hui. Ces mesures, pour être facilement interprétables, doivent être corrélées autant que faire se peut avec la sensation visuelle humaine.

UNE NOUVELLE ÉCHELLE DE BRILLANT

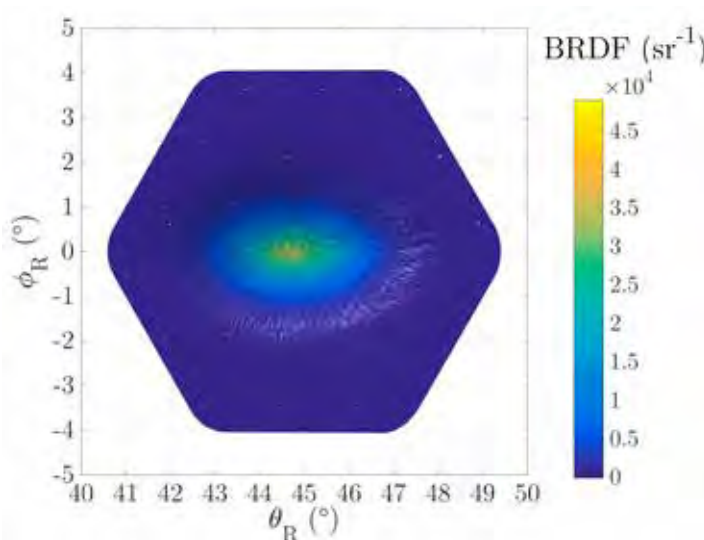
Au sein d'xDReflect, le Laboratoire a développé une nouvelle échelle de brillant, plus représentative des stimuli naturels, plus riche de nombreuses dimensions. Le LNE-LCM a pu travailler sur la quantité pertinente en la matière, qui est la fonction de répartition bi-directionnelle

Comme nous le suspicions, le brillant se révèle une notion d'une très grande complexité... Grâce à nos travaux, nous avons pu formaliser cette complexité et ouvrir de nombreuses questions.

Gaël Obein, maître de conférences au LNE-LCM/CNAM.

du coefficient de luminance, plus connue sous son acronyme anglais BRDF. La BRDF est le rapport de la luminance émise par la surface dans une direction sur l'éclairement de cette surface dans une autre direction. La BRDF se mesure avec un goniospectrophotomètre et permet de caractériser complètement la lumière réfléchie à la surface de l'échantillon.

Pour mettre en place une mesure physique qui s'accorde mieux avec la sensation visuelle observée, le LNE-LCM a travaillé sur son propre instrument de BRDF en poussant sa résolution angulaire : 0,012 meilleure que celle de l'œil humain ! Soit un ordre de grandeur de gagné par rapport à ce qui se faisait jusqu'à maintenant...



Pic spéculaire d'un échantillon de papier gris brillant. L'image représente environ 2,2 millions de directions d'observation. La résolution angulaire est de 0,0132°. Ce type de mesure fait apparaître la complexité du signal. Cette complexité est exploitée par le système visuel humain pour construire la sensation de brillant. C'est la première fois que l'on arrive à la mesurer instrumentalement.

Ce qu'il faut retenir

Ce projet va faire progresser les équipements de mesure des laboratoires nationaux de métrologie dédiés à la caractérisation de l'apparence des matériaux. Les incertitudes et le temps de mesure seront réduits, et la traçabilité des équipements sera assurée.

AFM MÉTROLOGIQUE : UNE PREMIERE EN FRANCE DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE POUR MIEUX ESTIMER L'INCERTITUDE DE MESURE DE L'INSTRUMENT

Le LNE-LCM détient un des trente AFM métrologiques disponibles dans le monde pour certifier les réseaux utilisés comme étalon de transfert en microscopie à force atomique. Grâce à son modèle numérique, les déplacements générés par l'instrument sont aujourd'hui contrôlés avec une incertitude de seulement quelques nanomètres suivant les six degrés de liberté.

Les microscopes à force atomique (AFM) sont utilisés pour l'étude des caractéristiques physiques d'objets à l'échelle du nanomètre, domaine où ces propriétés sont fortement liées aux dimensions. En nanométrie dimensionnelle, ce type d'instrument permet de mesurer une distance, un pas de réseau, une profondeur, mais aussi de caractériser une forme, une rugosité de surface, une épaisseur de couche mince...

UN ENJEU MÉTROLOGIQUE IMPORTANT

Les AFM sont étalonnés grâce à des réseaux étalons qui assurent leur « raccordement » métrologique au SI (Système International d'unités) et donc au mètre. Un enjeu métrologique important pour la cohérence et la précision des mesures concernées. « *Jusqu'ici, en France, par manque de moyen de raccordement, il était courant de faire appel à des laboratoires nationaux de métrologie étrangers pour étalonner ces réseaux* », constate Sébastien Ducourtieux, ingénieur chercheur au LNE-LCM - Nanométrie.

Pour pallier ce manque, l'équipe a développé l'unique exemplaire d'AFM métrologique en France. Cet instrument de référence est en passe de franchir sa dernière étape de développement, à savoir sa validation métrologique, au niveau international, dans le cadre d'un projet européen EMRP (*European Metrology Research Programme*) « Métrologie pour le mouvement et le positionnement suivant six degrés de liberté » (2013-2016). Un axe de recherche indispensable.

UNE VÉRITABLE INSTRUMENTATION VIRTUELLE

Le LNE-LCM a développé une véritable instrumentation virtuelle, car « *l'évaluation de certaines contributions pour l'établissement du bilan d'incertitude de l'AFM métrologique est difficile expérimentalement, voire impossible* », explique Sébastien Ducourtieux. Représentant une modélisation fidèle de la chaîne métrologique, le modèle numérique a été développé sous le logiciel Matlab en utilisant une programmation orientée objet. Il intègre les faisceaux lasers, les interféromètres, la position de la pointe de l'AFM, le prisme de mesure et de référence, ainsi que les miroirs. Les déplacements suivant les six degrés de liberté peuvent être générés sur le prisme mobile pour évaluer les erreurs de mesure.

Le LNE mettra son AFM métrologique, enrichi d'un modèle numérique, à disposition du secteur des nanosciences et nanotechnologies. Cela permettra de tirer vers le haut la nanométrie française."

Sébastien Ducourtieux, ingénieur-chercheur au LNE-LCM - Nanométrie.

Aujourd'hui, ce modèle permet de prendre en compte une centaine de paramètres ayant une influence sur la mesure de position de l'AFM métrologique (rotations parasites, défaut d'orthogonalité, dilatation thermique, alignement des faisceaux, etc.). Le modèle a été complété d'outils statistiques afin de distinguer les paramètres qui ont une influence ou non sur la mesure, de déterminer leurs sensibilités et de détecter les interactions critiques. Une toute première estimation de l'incertitude type de mise en position de l'instrument a été établie à ± 6 nm. Ce résultat fournit des indications très précieuses sur les améliorations qui devront être apportées à cet instrument afin de réduire l'incertitude de mesure.



AFM métrologique.

Ce qu'il faut retenir

Pour améliorer la métrologie des déplacements de haute précision, à six degrés de liberté indispensable au développement de son AFM métrologique, le LNE-LCM a développé une instrumentation virtuelle, ainsi que des compétences en génération de trajectoires évoluées.

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ENVELOPPE DES BÂTIMENTS : DEUX PROJETS INNOVANTS

Avec les deux projets InnoVIP et RESBATI, le LNE développe des méthodes d'essais et de simulation pour aider au développement de solutions innovantes contribuant à une amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments.

L'efficacité énergétique de l'enveloppe des bâtiments est un des leviers importants à disposition des politiques de gestion durable des ressources et d'économie d'énergie. La limitation des déperditions d'énergie (climatisation et chauffage) passe notamment par la connaissance et l'amélioration des performances d'isolation de l'enveloppe des bâtiments.

En pointe sur les mesures des performances des produits, le LNE mène, depuis 2016 et pour trois ans, deux projets importants : InnoVIP et RESBATI.

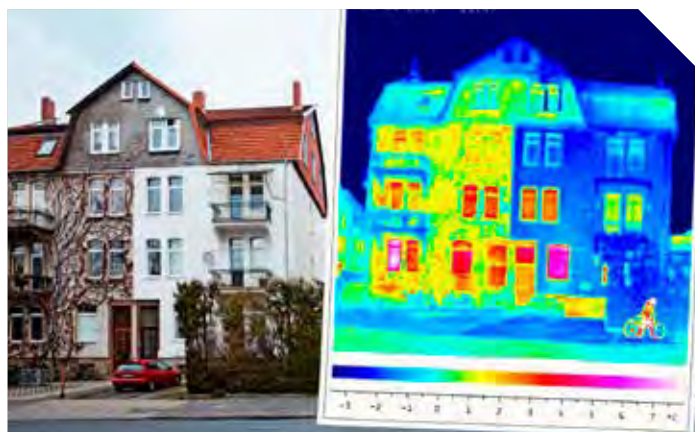
INNOVIP : UN SYSTÈME MULTIFONCTIONNEL À HAUTE PERFORMANCE D'ISOLATION

Le projet InnoVIP « *Innovative multi functional Vacuum Insulation Panels for use in the building sector* », co-financé par l'Union européenne, a pour objectif de développer un nouveau système isolant multifonctionnel (mise en œuvre facile, durée de vie accrue et coût réduit), basé sur des produits isolants sous vide pour réduire l'empreinte CO₂ des bâtiments.

Le LNE met à disposition son expertise et ses moyens d'essai pour étudier les performances thermiques du produit et l'impact du vieillissement sur ses propriétés physiques. Il vise aussi à modéliser numériquement les performances thermiques du système pour optimiser son design et limiter les ponts thermiques. Enfin, il cherche à optimiser les choix technologiques et développer un produit à la fois plus sain et plus sûr. Pour cela, le Laboratoire détermine les performances de revêtements nanochargés utilisés pour l'amélioration de la qualité de l'air intérieur et s'assure que le produit remplisse toutes les exigences réglementaires en matière de tenue au feu.

A noter

Ce système pourra servir pour diverses applications tant pour la construction de nouveaux bâtiments que pour la rénovation.



RESBATI : UNE MÉTHODE D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES THERMIQUES DES PAROIS OPAQUES

RESBATI (Résistance thermique de parois de bâtiment), un projet co-financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR), consiste à développer une méthode d'évaluation des performances thermiques des parois opaques de bâtiment par méthode active en y associant une incertitude de mesure. L'approche se focalise sur la réalisation d'un appareil de mesure portable destiné à la caractérisation de ce type de parois sur site, pour tout type de bâtiment, qu'il soit occupé ou non, et en toute saison.

La thermographie infrarouge en mode passif a fait la preuve depuis de nombreuses années de sa capacité à révéler la présence de défauts d'isolation. Cependant, elle demeure essentiellement qualitative. L'approche dite active est encore trop peu utilisée alors qu'elle permet d'obtenir des informations quantitatives comme la résistance thermique de la paroi à diagnostiquer.

Le LNE met à disposition ses équipements et ses compétences en thermographie infrarouge et en mesure de conductivité thermique pour caractériser le système sur des parois réelles. Il réalisera aussi le bilan d'incertitude du système.

A noter

Les outils de mesure développés au cours de cette étude pourront faire l'objet d'un dépôt de brevet, le marché envisagé semblant prometteur.

Le LNE participe activement à l'accompagnement des industriels dans le développement de nouvelles solutions innovantes pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. "

Damien Marquis, ingénieur de recherche au LNE -
Pôle Énergie, Environnement et Combustion.

AUTOMATISMES

DE NOUVELLES MÉTHODES D'ÉVALUATION POUR LE VÉHICULE AUTONOME ET LES ROBOTS DOMESTIQUES

Intelligence artificielle, simulation pour la sécurité des véhicules autonomes, robotique... Le LNE participe, par son activité de recherche sur la validation des systèmes à base d'intelligence artificielle, à sécuriser la voiture de demain, l'usine du futur et même les futures applications d'aide à la personne avec les robots domestiques.

Le transfert des technologies en provenance des laboratoires de recherche doit être facilité. Cette préoccupation est au cœur des actions du LNE, afin de soutenir la R&D et le développement des grands projets industriels.

C'est l'un des objectifs de deux projets dans lequel le LNE est impliqué : le projet SVA (simulation pour la sécurité des véhicules autonomes) et le projet Robocom++ (développement des robots compagnons). Ils visent à transmettre des méthodes d'évaluation des systèmes d'intelligence artificielle pour le développement de l'usine du futur, de l'automobile de demain et de la robotique.

SVA : PRISES DE DÉCISION DU VÉHICULE AUTONOME

Le projet SVA, mis en œuvre dans le cadre d'un des Instituts de recherche technologique (IRT SystemX), avec les principaux constructeurs, équipementiers français ainsi que des PME spécialistes sur la sécurité de fonctionnement, cherche, par la simulation numérique, à répondre au défi posé par la complexité de la démonstration de la sécurité du véhicule autonome.

Il s'agit ici de développer des méthodes communes pour comparer les différentes solutions qui peuvent être intégrées au sein d'un véhicule autonome. Cela concerne à la fois l'aide au développement des technologies mais aussi la validation de certains composants du véhicule en limitant le nombre de kilomètres à parcourir. Plusieurs équipes du LNE sont investies, et ont déjà proposé un premier protocole de validation des prises de décision des systèmes de contrôle automatique de la vitesse afin de vérifier que le véhicule respecte les distances de sécurité entre lui et un autre véhicule.

Le laboratoire a créé les références permettant d'établir à quel moment le véhicule ne respecte plus les conditions de

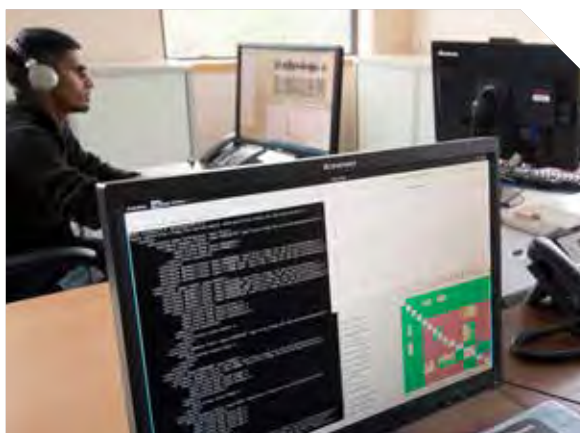
sécurité. Ces références ont été intégrées dans le système de simulation de test, développé par le LNE, pour qualifier les prises de décision du véhicule.

ROBOCOM++ : DÉVELOPPEMENT DES ROBOTS COMPAGNONS

Le projet Robocom++, quant à lui, ouvre un espace collaboratif de recherche européen, autour de 27 laboratoires publics, pour le développement et la validation des composants des robots compagnons. Ce sont des robots humanoïdes susceptibles de réaliser des tâches d'accompagnement des personnes comme le port de charges lourdes.

Principal enjeu : la sécurité pour la population. La validation des solutions implémentées requiert de changer de paradigme : les robots intègrent des algorithmes très sophistiqués d'intelligence artificielle qu'il faut qualifier en plus de tous les éléments mécaniques inclus dans ces robots.

« Le LNE va pouvoir ainsi transmettre à la communauté scientifique de la robotique les notions de reproductibilité, de répétabilité et de justesse qu'il maîtrise par son métier, la métrologie... », conclut Juliette Kahn, chercheuse au LNE.



Ce qu'il faut retenir

Avec le projet européen Robocom++, le LNE participe à la mise en place d'un espace de recherche sur les robots compagnons, qui seront dans les prochaines années utilisés pour aider l'homme à réaliser des tâches difficiles.

Dans les grands projets industriels, la R&D a besoin que soit facilité le transfert des technologies en provenance des laboratoires de recherche. C'est un des objectifs importants des projets développés par le LNE. ”

Juliette Kahn, chercheuse au LNE – Département Essais en environnements et technologies de l'information.

SÉCURITÉ SANITAIRE

QUAND LES HUILES MINÉRALES DES EMBALLAGES CONTAMINENT LES ALIMENTS

Comment évaluer la contamination potentielle d'un aliment dans un carton d'emballage recyclé par des huiles minérales ? Le LNE a mis en place et validé un protocole de test et de modélisation, et montré que de petites, comme de grandes quantités d'huiles, peuvent migrer, même à basse température.

En octobre 2015, l'ONG Foodwatch a alerté les pouvoirs publics sur la contamination possible de certains aliments par des huiles minérales issues principalement des papiers et cartons recyclés. Les contaminants de type huiles minérales comprennent jusqu'à 30 % de composés aromatiques qui peuvent agir comme des cancérrogènes génotoxiques (endommageant l'ADN et le matériel génétique des cellules).

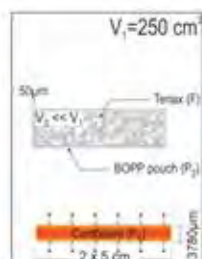
Le sujet est très sensible sur le plan sanitaire, car il met en évidence des possibilités de contamination bien au-delà du seul emballage primaire (contaminations des matériaux avant contact). Il impacte aussi les pratiques de l'industrie. Hormis les huiles minérales blanches autorisées dans la fabrication des matières plastiques, il n'existe pas de seuil acceptable d'huiles minérales dans les emballages de produits alimentaires, même si depuis 2012 des recommandations sont basées sur une dose journalière admissible. Pour définir ces limites, il est important de connaître les phénomènes mis en cause afin de proposer des outils d'analyse ou de prédiction permettant de concevoir des emballages sûrs.

Il y a toujours transfert des huiles minérales à travers les papiers, cartons et matières plastiques, c'est simplement une question de temps ! Respecter les règles de bonnes pratiques de fabrication nous paraît le moyen le plus efficace pour éviter la contamination des aliments. "

Jean-Mario Julien, ingénieur-chercheur au LNE - Pôle Chimie et Physico-chimie des matériaux.



Dispositif expérimental représentant un simulateur alimentaire emballé dans un sac en PP biorienté et un carton dopé avec des solutés sans contact direct.



PROTOCOLES DE TEST ET D'ANALYSE DES HUILES MINÉRALES

Il faut donc mettre en place des protocoles de test et d'analyse des huiles minérales. Le projet ACTIA - RMT ProPack Food* « Évaluation de la contamination potentielle d'un aliment par des huiles minérales » (2016), dans lequel est impliqué le LNE, propose ainsi de mettre en place et de valider un protocole de test et de modélisation.

* (ACTIA : Association Technique pour l'Industrie Agro-Alimentaire - RMT : Réseau Mixte Technologique).

ABAQUES DE SUIVI DE LA CONTAMINATION

Deux catégories de composés sont identifiées dans ces phénomènes de contamination par voie indirecte : les MOAH (mineral oil aromatic hydrocarbons) et les MOSH (mineral oil saturated hydrocarbons). Des abaques de suivi de la contamination par MOAH et MOSH, en fonction de la température et de la durée et du poids moléculaire, ont été construits à partir des valeurs expérimentales obtenues à différentes températures (20 °C, 40 °C et 60 °C), pour un type de film plastique.

La migration en phase gazeuse, considérée comme faible et non significative pendant des décennies, est alors mise en évidence : « *Notre étude a confirmé que de petites, comme de grandes quantités peuvent migrer. Même à basse température, ce n'est qu'une question de temps d'exposition* », explique Jean-Mario Julien. Le paramètre température accroît les phénomènes de diffusion, et cela jusqu'à un facteur 50 pour une différence de température de 40 °C avec l'ambiant usuel. Autre facteur déterminant de ces diffusions : la présence d'air contenu entre l'aliment et son emballage plastique.

Le but des travaux du LNE est de pouvoir prédire le résultat de la migration d'un composé en fonction des conditions réelles d'emploi d'un matériau. « *Et ce afin de modéliser la migration des composants et mettre nos abaques à disposition de tous les acteurs de la filière.* » précise Jean-Mario Julien.

Ce qu'il faut retenir

Les huiles minérales suspectées d'être cancérogènes, présentes dans des emballages recyclés, migrent vers les aliments. Le LNE l'a mis en évidence, même à basses températures. Pour aider les industriels à concevoir des contenants sûrs, le Laboratoire travaille sur la modélisation de la migration en construisant des abaques permettant de suivre la contamination.

MÉCATRONIQUE

AMÉLIORER LA FIABILITÉ ET LA SÉCURITÉ DES SYSTÈMES



Combinaison d'électronique, de mécanique, d'automatisme et d'informatique, les systèmes mécatroniques présentent de forts enjeux pour l'industrie. Comment fiabiliser ces systèmes complexes ? Le LNE élabore des méthodologies d'analyse permettant d'aider à concevoir plus vite et à moindre coût les futurs dispositifs mécatroniques.

Rien que dans une voiture, des centaines de dispositifs, appelés unités de contrôle électronique, gèrent l'ensemble du véhicule : climatisation, vitesse, freinage...

La mécatronique, qui a pour finalité « une action physique pilotée par une brique intelligente », associe électronique, mécanique, automatisme et informatique. En cas de défaillance sur un composant, cela peut engendrer le retour véhicule avec sa cohorte de coûts et de problèmes de sécurité...

Automobile, mais aussi aéronautique ou défense : la mécatronique étant de plus en plus répandue, et de façon générale l'intégration croissante des capteurs sur les systèmes mécaniques, comment fiabiliser les systèmes ?

L'intégration de nombreux capteurs sur des systèmes mécaniques a impulsé une nouvelle science dans la fiabilité à partir des années 2000, la mécatronique. Il faut aider l'industrie avec des modèles prédictifs capables d'évaluer au mieux la fiabilité de certains composants et systèmes. ”

Morgane Presle, ingénieure d'essais matériaux au LNE - Pôle Chimie et Physico-chimie des Matériaux.

NOUVELLES MÉTHODES POUR UNE FIABILITÉ ACCRUE

Avec le projet « FiRST-MFP » (fiabiliser et renforcer des systèmes technologiques mécatroniques de forte puissance), dans lequel le LNE est impliqué jusqu'en juin 2017, des modèles prédictifs sont établis pour le calcul du taux de défaillance de certains composants et systèmes. Le LNE, en partenariat avec des industriels comme Valeo, Thales, Safran ou NXP, travaille tout particulièrement sur l'identification et l'analyse expérimentale des mécanismes de défaillance de composants électroniques, comme des condensateurs film et électrochimiques ou des diodes. Objectif : mettre en évidence de potentielles dégradations après la réalisation d'essais accélérés et aggravés. Pour ce faire, une méthodologie d'analyse spécifique à chaque type de composant est mise en œuvre. Parmi les moyens retenus : analyse de construction, analyse chimique des constituants via des méthodes spectroscopiques ou chromatographiques, mais aussi analyse thermique, examen sur coupe métallographique et observations MEB (microscopie électronique à balayage).

« Le projet a pour ambition de proposer de nouvelles méthodes permettant à la fois de concevoir plus vite et à moindre coût les futurs dispositifs mécatroniques de rupture pour les secteurs industriels de l'automobile et de l'aéronautique, tout en leur garantissant une fiabilité accrue », insiste Morgane Presle, ingénieure d'essais matériaux du LNE.

Un ouvrage, qui se veut être un guide de conception de systèmes mécatroniques plus fiables, est d'ailleurs en cours d'élaboration.

Ce qu'il faut retenir

Pour fiabiliser, à moindre coût, les systèmes technologiques mécatroniques, le LNE met en œuvre toute une série d'analyses pour des secteurs industriels (automobile, aéronautique, défense) où la sécurité, l'innovation et la compétitivité sont des enjeux majeurs.

STOCKAGE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES DE MEILLEURES PERFORMANCES MÉTROLOGIQUES POUR LES SYSTÈMES DE DÉTECTION RAMAN DTS

Le LNE-LCM travaille à mieux caractériser sur le plan métrologique les systèmes de mesure de température à base de fibres optiques, dits à effet Raman, qui servent notamment dans le domaine nucléaire.

La thermométrie est une méthode bien connue et utilisée pour la détection de fuite dans les ouvrages de génie civil en terre, mais aussi dans le secteur nucléaire. Les techniques récentes de mesure thermométriques basées sur des capteurs dits « répartis de température » (DTS-distributed temperature sensing) à effet Raman sont de plus en plus évaluées par les industries nucléaire et hydraulique, car elles peuvent apporter des alternatives prometteuses aux techniques de mesure classiques. Rappelons que l'effet Raman est un phénomène physique par lequel un milieu peut modifier la fréquence de la lumière qu'il absorbe et le réémet par désexcitation spontanée.

EDF exploite, par exemple, des capteurs répartis à fibre optique de mesure de température par cette technique, pour la détection de fuites d'eau dans les barrages et digues en terre. Cette technique est intéressante pour l'ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs), dans le suivi à long terme (100 ans) des structures de stockage de déchets radioactifs pour lesquels sont utilisés des capteurs spéciaux à fibre optique. Précisément, dans les sites de stockage souterrains, qui doivent être durables, les déchets radioactifs peuvent échauffer le béton et l'argile. Cette dernière, pourtant réputée pour son étanchéité, peut perdre une partie de ses propriétés si elle est exposée à de trop hautes températures. Une surveillance à long terme est donc nécessaire.

En l'absence de normes existantes pour la mesure par systèmes DTS, un support métrologique est absolument nécessaire pour les applications industrielles devant assurer la traçabilité des mesures dans le temps.

Lors de la surveillance d'ouvrages hydrauliques ou nucléaires, la fiabilité des mesures doit être assurée sur des périodes longues, généralement des dizaines d'années. Les systèmes de mesure à fibres optiques sont prometteurs. ”

Guillaume Failleau, ingénieur de recherche LNE-LCM - Département Matériaux.

Ce qu'il faut retenir

Le LNE-LCM contribue, pour la première fois, à établir une norme métrologique des capteurs de température répartis par fibre optique pour assurer une surveillance sur le long terme des sites nucléaires notamment.

ÉTABLIR UNE NORME

Dans le cadre des projets européens ENV54-MetroDecom (2014-2017) et 16ENV09- MetroDecom II (2017-2020), le Laboratoire contribue à établir des normes métrologiques de systèmes de mesure de température répartis à base de fibres optiques.

« Une tâche clé consiste à vérifier les performances revendiquées par les fabricants d'appareils DTS », explique Guillaume Failleau, ingénieur de recherche au LNE-LCM-Matériaux. Les performances métrologiques et les caractéristiques des dispositifs DTS, telles que leurs limitations et leur exactitude, ainsi que les aspects pratiques des systèmes mis en œuvre sur site, doivent être évaluées étape par étape. Des méthodes et des équipements ont été développés au Laboratoire pour la caractérisation métrologique des capteurs. Un four horizontal de 25 mètres de long et plusieurs enceintes thermiques ont été spécifiquement conçus pour étudier les performances des systèmes utilisant des fibres optiques déployées linéairement ou enroulées sur une bobine. Résultats : le LNE-LCM a émis les premiers certificats de caractérisation, et le banc est prêt à passer au service de l'industrie.



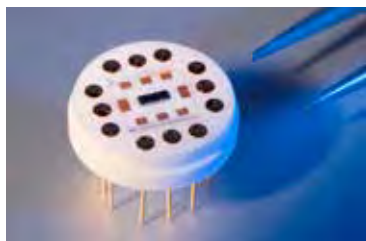
NOUVELLE DÉFINITION DU SI L'AMPÈRE PASSE À L'ÈRE QUANTIQUE

C'est une première ! Le LNE a réussi à créer un étalon quantique de l'ampère à partir de la charge élémentaire, avec une incertitude relative de 10 parties par milliard (10^{-8}). Le laboratoire concrétise la future définition de l'unité d'intensité du courant électrique dans le SI dont le but est de s'affranchir de la définition électromécanique actuelle datant de 1948.

Le Système international d'unités (SI) devrait connaître une évolution majeure en 2018 : lors de la Conférence générale des poids et mesures qui se tiendra à Paris, les scientifiques ambitionnent de moderniser le SI en le mettant en accord avec la physique moderne. Certaines unités doivent être redéfinies à partir de constantes fondamentales de la physique (la constante de Planck pour le kilogramme, la constante de Boltzmann pour le kelvin...), en s'appuyant sur la physique quantique et la physique statistique, et en faisant disparaître les artefacts matériels. L'ampère, unité d'intensité de courant électrique, sera ainsi définie par un flux de charges élémentaires par seconde, et non plus à partir d'une force électromécanique exprimées en newtons. Une réduction des incertitudes de mesure est attendue. Encore faut-il que des étalons concrétisant ces définitions puissent être développés... C'est chose faite pour l'ampère, en 2016, suite aux travaux du LNE.

Ce qu'il faut retenir

Pour la première fois, un laboratoire a réussi à développer un étalon quantique de courant fondé sur les étalons quantiques de résistance et de tension, réalisant l'ampère à partir de la charge élémentaire avec une incertitude inégalée jusqu'alors. Une avancée qui s'inscrit dans la modernisation du SI prévue en 2018.



Un nouveau générateur quantique de courant ouvre la voie à une métrologie électrique complètement fondée, à l'avenir, sur l'ingénierie des étalons quantiques et des constantes fondamentales de la physique.

Wilfrid Poirier et Sophie Djordjevic, chefs de projet au LNE/DMSI - Pôle Métrologie électrique quantique.

PREMIÈRE MONDIALE POUR UN ÉTALON QUANTIQUE DE COURANT ÉLECTRIQUE

Un étalon quantique de courant électrique, universel et pratique a été réalisé par le groupe de métrologie électrique quantique du LNE. Et ce dans le cadre d'un projet de métrologie en électricité quantique du RNMF qui a débuté fin 2014 et va courir jusqu'à 2020, avec le support du projet européen EMPIR (*European Metrology Programme for Innovation and Research*) « e-Si-Amp ». Publiés dans le journal scientifique de l'American Physical Society (*Physical Review X* 6, 041051 / 2016), les travaux ont abouti à générer des courants dont les intensités, dans la gamme du microampère au milliampère, sont reliées à la charge élémentaire avec une incertitude relative de dix parties par milliard (soit 10^{-8}). La performance a pu être atteinte grâce à la mise au point d'un circuit électrique original permettant d'appliquer, sans erreur, la loi d'Ohm (soit la relation entre courant, tension et valeur d'une résistance) aux étalons quantiques de résistance et de tension qui reposent sur l'effet Hall quantique et l'effet Josephson. Ces deux effets quantiques macroscopiques se manifestent, l'un dans des conducteurs bidimensionnels et l'autre dans des supraconducteurs. De plus, ils sont reliés uniquement à deux constantes fondamentales de la physique quantique, la constante de Planck et la charge élémentaire. Cette avancée permet d'améliorer les incertitudes sur la traçabilité des mesures de courant de deux ordres de grandeur par rapport à celles déclarées par les instituts nationaux de métrologie. Avec, par exemple, comme conséquences pratiques pour la science comme pour l'industrie, des mesures électriques bénéficiant de la précision et de la reproductibilité quantique.

« Ce nouveau générateur quantique de courant ouvre la voie à une métrologie électrique complètement fondée, à l'avenir, sur l'ingénierie des étalons quantiques et des constantes fondamentales de la physique », explique l'équipe de chercheurs : Jérémie Brun-Picard, Sophie Djordjevic, Dominique Leprat, Félicien Schopfer et Wilfrid Poirier.

Echantillon à effet Hall quantique BNM-LEP514 (en haut à gauche), réseau Josephson programmable 1V fabriqué à la PTB (en bas à gauche) et système de mesure à très basse température (1.3 K) (à droite) utilisés pour réaliser le générateur quantique de courant.

COMPOSANTS ET CAPTEURS DU NOUVEAU DANS LA MÉTROLOGIE DES IMPÉDANCES

L'impédance est une grandeur clé dans le cadre des développements en cours en nanoélectronique. L'industrie des composants et des capteurs a besoin, dans ce contexte, d'étalonnages performants d'appareils de mesure. Le LNE développe de nouvelles références pour la mesure de très faibles valeurs de capacité.

On peut définir l'impédance électrique (ohm) comme la mesure de l'opposition d'un circuit électrique au passage d'un courant alternatif sinusoïdal. Quand elle est sous la forme d'une capacité électrique (farad), cela représente la quantité de charge portée par un conducteur pour un potentiel électrique donné. Cette caractéristique est essentielle dans l'industrie électronique, pour de nombreux composants et capteurs. La métrologie des impédances connaît de forts changements.

MÉTROLOGIE LIMITÉE AUX YEUX DES CHERCHEURS

Les mesures d'impédance sont centrales en métrologie électrique et dans les disciplines qui utilisent les variations d'impédance dans les capteurs de mesure. Aujourd'hui, dans les différents laboratoires nationaux de métrologie, comme au LNE, la métrologie des impédances aux meilleures incertitudes s'effectue au moyen de ponts coaxiaux manuels utilisant des transformateurs étalons qui ne peuvent être utilisés que sur une gamme limitée de fréquences. « *Nous voulons étendre ces possibilités en matière de métrologie des impédances* », expliquent Olivier Séron et Olivier Thévenot, ingénieurs de recherche au LNE.

Les transformateurs sont remplacés par des convertisseurs numériques qui permettent des mesures plus faciles et plus souples. Concrètement, « *il s'agit de mettre en œuvre de nouvelles techniques, par synthétiseurs Josephson et générateurs DDS (digital direct synthesizer) de signaux polyphasés, pour réaliser des ponts d'impédances automatiques capables de mesurer plus facilement une plus large gamme d'impédances sur la plage de fréquence audio complète (20 Hz à 20 kHz)* ». C'est l'objet du programme européen « *Automated impedance metrology extending the quantum toolbox for electricity* » (2013-2016), dans lequel le LNE a développé de nouvelles références pour des valeurs très faibles de capacité, et ainsi assurer la traçabilité du farad (F) jusqu'à 10 aF (attofarad soit 10^{-18} F) au Système international d'unités (SI).

L'industrie nous demande de mettre en œuvre de nouvelles techniques pour mesurer plus facilement les impédances.

Olivier Séron et Olivier Thévenot, ingénieurs de recherche au LNE/DMSI - Pôle Métrologie électrique.

UNE IMPÉDANCE MIEUX MESURABLE

Au sein de ce projet, le LNE a été chargé de la mise en œuvre de la traçabilité des très faibles valeurs de capacité avec la réalisation d'une série de condensateurs de valeurs décadiques comprises entre 10 aF et 100 fF (femtofarad, soit 10^{-15} F), d'une capacité programmable capable de délivrer un grand nombre de valeurs prédéfinies de capacités de 10 aF à 10 pF (picofarad soit 10^{-12} F). Ces développements permettront l'étalonnage de systèmes micro-nano-électromécaniques (MEMS/NEMS) et de systèmes de mesure connectés sur des dispositifs tels que des sondes ou des microscopes à force atomique fonctionnalisés. Le tout avec une incertitude cible de seulement 1 % pour la capacité la plus faible (10 aF à 1 kHz).

Ce qu'il faut retenir

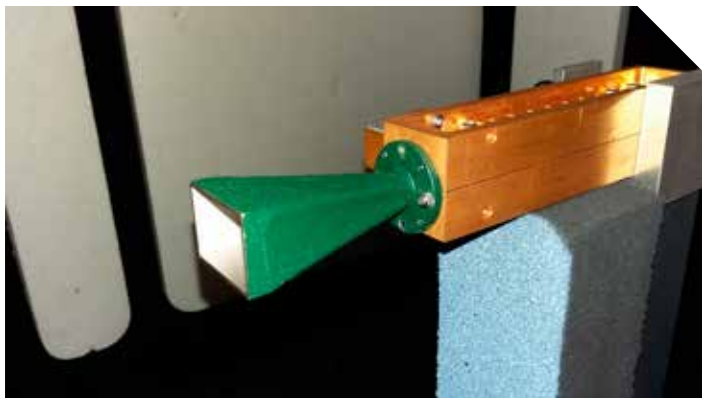
C'est un projet de métrologie plus amont, mais aux impacts industriels importants : étendre les possibilités d'étalonnage d'impédances au sein des laboratoires de métrologie et d'étalonnage de haut niveau.



Capacité étalon programmable composée de condensateurs étalons de 10 aF à 100 fF associés à un multiplexeur coaxial 20 voies.

TÉLÉCOMS

MORSE AFFINE LES TECHNIQUES DE MESURE POUR LES NOUVEAUX RÉSEAUX



Base compacte de mesure d'antenne installée à l'IETR (Université de Rennes 1).

Fibre, sans fil, antennes, satellites... l'évolution permanente et nourrie d'innovation de l'industrie des télécoms génère de nouveaux besoins en métrologie. Avec le projet MORSE, le LNE participe au développement de techniques de mesures avancées applicables aux nouveaux réseaux.

L'essor des télécommunications s'accompagne naturellement et de façon continue de nouveaux besoins de mesure et de qualification pour des systèmes toujours plus performants et innovants. Dès lors, il y a un véritable enjeu métrologique consistant à définir des méthodes pour mieux qualifier des systèmes à très haut débit (fibre optique, liaisons sans fil, antenne MIMO - *Multiple-Input Multiple-Output*, satellite...)

Et avec la montée continue du débit de données, les composants doivent être plus performants, ce qui entraîne pour les spécialistes en métrologie de devoir améliorer les méthodes de mesure et d'étalonnage.

Ce qu'il faut retenir

Pour répondre aux besoins métrologiques liés au déploiement de technologies haut débit, le LNE tend à développer des techniques de mesures avancées applicables aux nouveaux réseaux de télécommunication.

TECHNIQUES DE MESURES AVANCÉES POUR LES NOUVEAUX RÉSEAUX

Le projet MORSE (*Metrology for optical and RF systems*) va dans ce sens. C'est un projet européen de métrologie (2013-2016) coordonné par le NPL (Grande-Bretagne), et dans lequel le LNE a joué un rôle important aux côtés de la PTB (Allemagne) et de l'université de Rennes 1. « *L'objectif est le développement de techniques de mesures avancées applicables aux nouveaux réseaux de télécommunication, pour assurer la traçabilité de la forme d'onde des signaux optiques transmis sur fibres, des signaux RF (radio fréquence) conduits et rayonnés* », détaille Jean-Marie Lerat, chef de projet au LNE.

Le LNE a précisément participé aux travaux sur la mesure de signaux LTE (*Long Term Evolution*) modulés, à la définition d'une méthode d'étalonnage applicable à ces signaux, et a dirigé des actions sur le développement de techniques de mesure d'antenne avancées, incluant le sous-échantillonnage et le post-traitement des mesures. Pour ce faire, le LNE a mis en œuvre des méthodes de traitement de données applicables aux mesures d'antenne en base compacte, destinées à compenser les défauts inhérents à ces moyens de mesure. Il a également développé et mené des étalonnages d'antenne mise en température de 0 à 50 degrés, et effectué des comparaisons de diverses techniques de mesure (puissance moyenne, pic, analyse spectrale) de signaux télécoms.

Au final, ce sont « *de nouveaux outils pour améliorer la qualité de mesures des systèmes de télécommunication sans fil* », conclut Jean-Marie Lerat.

La métrologie s'adapte à l'évolution technologique. C'est particulièrement vrai dans les télécoms, où qualifier les instruments au service des professionnels permet de mieux mesurer les performances. "

Jean-Marie Lerat, chef de projet au LNE - Responsable du département Électricité haute fréquence.

INDUSTRIE NUCLÉAIRE DES DOSIMÈTRES PLUS PERFORMANTS

En créant, en France, une installation produisant un « champ thermique » pour étalonner les dosimètres neutrons, le LNE-IRSN offre de nouveaux moyens au service des exploitants de l'industrie nucléaire, pour des dosimètres précis et fiables dans ce domaine d'énergie.

Des « champs thermiques et réalistes » de neutrons produits en laboratoire sont exploités pour étalonner des appareils de radioprotection, utilisés notamment dans l'industrie nucléaire. Il s'agit d'installations permettant de reproduire des conditions de rayonnement expérimentales ou proches de celles rencontrées aux postes de travail. Il faut en effet des dosimètres précis et fiables dans le domaine d'énergie concerné, et il est en conséquence nécessaire d'étalonner les appareils avant leur mise en service sur une installation de référence.

Le Laboratoire de métrologie et de dosimétrie des neutrons (LMDN) de l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire), dans le cadre de son association avec le LNE, réalise déjà des étalonnages d'appareils de mesure à partir de divers champs de neutrons de référence, mais ne dispose plus d'un dispositif capable de produire un champ thermique. En effet, avant 2006, ce champ thermique était produit par l'installation SIGMA via la modération de six sources d'Am-Be (américium-béryllium), datant de la fin des années 1960. Âgées de plus de dix ans, les sources ont dû être évacuées.

Comment rattraper un véritable retard industriel du fait de l'arrêt de SIGMA ? Une réflexion s'est engagée pour se doter d'une nouvelle installation.

CHAMP THERMIQUE « PUR »

Le LNE-IRSN s'est engagé dans la mise en place d'une nouvelle référence thermique en s'appuyant sur son expérience et son savoir-faire en la matière.

Une première série d'études par simulation numérique avait été menée en 2006, relative à la mise en place d'un champ thermique utilisant un accélérateur T400 de la marque SAMES. Cette version, qui revêt un caractère provisoire du fait de la vétusté de l'accélérateur T400, est en cours de construction à Cadarache et devrait voir le jour d'ici mi-2018.

La possibilité de produire un nouveau champ de neutrons thermiques, en utilisant un autre accélérateur du LNE-IRSN, appelé AMANDE, a fait l'objet d'études par simulation en 2016, dans le cadre du projet « Mise en place d'un champ de neutrons réalistes à forte composante thermique ». Cette solution, plus pérenne, nécessitera des investigations complémentaires, notamment sur le plan technologique, et prendra le relais, à terme, de la solution transitoire basée sur l'accélérateur T400.

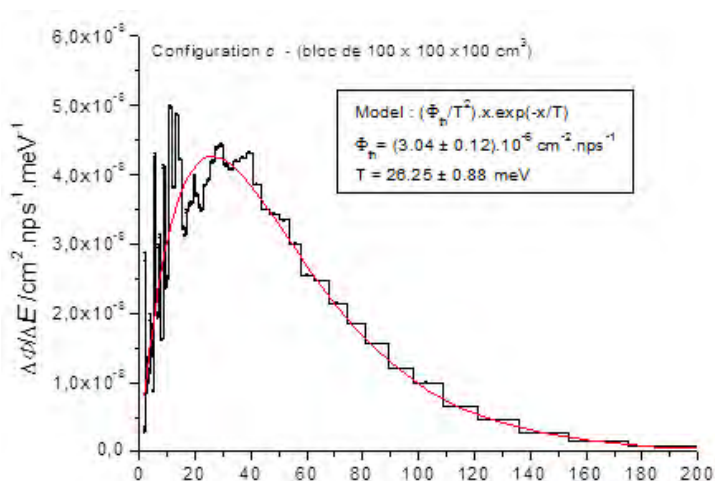
Il s'agissait de rattraper un retard industriel du fait de l'arrêt d'un précédent dispositif d'étalonnage appelé SIGMA... Grâce au LNE-IRSN, la France va pouvoir à nouveau proposer aux exploitants et aux fabricants l'étalonnage de leurs dosimètres sans avoir besoin de faire appel à des services d'autres pays. "

Véronique Lacoste, ingénieure-chercheuse au laboratoire de métrologie et dosimétrie des neutrons, LNE-IRSN.

Actuellement, on compte seulement trois champs thermiques en Europe, au NPL en Grande-Bretagne, à la PTB en Allemagne et au CMI en République Tchèque, insuffisants par rapport aux besoins actuels. « Grâce au LNE-IRSN, la France va pouvoir à nouveau proposer aux exploitants et aux fabricants entre autres, d'étalonner sans avoir besoin de passer par l'étranger », précise ainsi Véronique Lacoste, chef du projet au LNE-IRSN.

Ce qu'il faut retenir

Le LNE-IRSN s'est engagé dans la mise en place d'un champ neutronique thermique de référence pour l'étalonnage de dosimètres et autres instruments de mesure, en s'appuyant sur son expérience et son savoir-faire en la matière acquis sur une installation précédente.



Distribution en énergie de la fluence neutronique à 50 cm d'un bloc de graphite de dimensions (100 x 100 x 100 cm³), générée par un champ neutronique d'énergie initiale de 144 keV. La distribution est ajustée par une fonction Maxwellienne (en rouge).

LONGUES DISTANCES

RÉDUIRE L'INCERTITUDE DES MESURES DE DISTANCES KILOMÉTRIQUES

Comment mesurer de (très) longues distances avec des incertitudes au niveau ou inférieures au millimètre ? Le LNE-LCM/CNAM a développé un télémètre optique permettant d'améliorer significativement la résolution des mesures de distance jusqu'à 5 km, et d'envisager une nouvelle approche plus exacte.

Tunnels, accélérateurs géants en physique des hautes énergies, géodésie, surveillance des déformations sur des sites critiques... de plus en plus souvent, les géomètres et les chercheurs en géosciences sont confrontés à la difficulté de mesurer les distances sur plusieurs centaines de mètres ou plusieurs kilomètres, avec des incertitudes au niveau ou inférieures au millimètre.

« *Les techniques actuelles sont insuffisantes* », souligne Jean-Pierre Wallerand, ingénieur de recherche au LNE-LCM/CNAM. Celle par la mesure de distance électronique (EDM) est limitée par la détermination des paramètres atmosphériques. La mesure par système de navigation par satellites (*Global Navigation Satellite System*, GNSS) est affectée par les retards de propagation dans l'atmosphère. Dans les deux cas, il n'est pas possible d'obtenir une incertitude submillimétrique ou même millimétrique sur de longues distances.

TÉLÉMÈTRE OPTIQUE

Le projet européen « Surveying : Métrologie pour les mesures de longue distance », mené de 2013 à 2016, a permis de réduire le niveau d'incertitude pour ce type de mesures de longue distance, ainsi que leur traçabilité aux unités SI. Le LNE-LCM/CNAM a développé entièrement un télémètre optique (technique EDM) avec une portée de 5 km et une résolution exceptionnelle. En effet, lorsque les conditions atmosphériques sont très stables, la résolution de la mesure de distance est de $3 \mu\text{m}$ sur 864 m (soit $3 \cdot 10^{-9}$ en valeur relative). Cette mesure a été réalisée sur une ligne géodésique de référence en Finlande (Nummela). Cette ligne de mesure est certainement la distance de référence la plus exacte au monde. Elle est reliée à la

définition du mètre par une technique interférométrique en lumière incohérente qui est mise en place régulièrement sur la baseline et qui permet de raccorder les 864 m à une cale étalon en quartz de 1 m.

INCERTITUDE RÉDUITE

Une comparaison a été faite avec les valeurs vraies de la baseline connue à 100-200 μm près. Pour tous les piliers de la baseline (5 au total répartis sur 864 m), l'écart à la valeur vraie ne dépasse pas 300 μm . Sur 5 km, dans des conditions normales, la résolution des mesures faites avec notre télémètre est de 25 μm .

Il est prévu de compenser les variations de l'indice de l'air en temps réel (dus au vent et aux variations de température), en ajoutant une instrumentation pour mettre en œuvre une seconde longueur d'onde au dispositif de télémétrie. Cela permettra de mesurer sans point intermédiaire des distances de 5 km ou plus avec une exactitude sub-millimétrique sans avoir à déterminer la température et la pression de l'air.

« *Au cours du projet, des solutions techniques et des méthodes nouvelles pour les mesures de longue distance ont été développées et validées. Elles devraient déboucher rapidement sur la mise au point d'instruments permettant d'améliorer l'exactitude des mesures en topographie, géodésie et pour les sciences de la terre* », conclut Jean-Pierre Wallerand.

Ce qu'il faut retenir

L'objectif de ce thème de recherche est de réduire le niveau d'incertitude des mesures de longue distance, sur plusieurs kilomètres, de faciliter leur mise en œuvre et d'améliorer la traçabilité aux unités.

Les instruments actuels ne permettent pas d'assurer la traçabilité à la définition SI du mètre avec une incertitude submillimétrique sur des longues distances. Une nouvelle approche est nécessaire."

Jean-Pierre Wallerand, ingénieur de recherche au LNE-LCM/CNAM.

Télémètre de haute exactitude pour la mesure de grande distance.



MACHINES-OUTILS

AMÉLIORER L'EXACTITUDE DES MACHINES PAR UN CONTRÔLE EN LIGNE

Comment mieux qualifier les machines-outils ? Jusqu'ici, on fabriquait une pièce puis on la contrôlait hors ligne. Le LNE-LCM et le LURPA (Laboratoire de recherche en production automatisée, à Cachan) ont réussi à développer un étalon original pour effectuer un contrôle in situ. De quoi améliorer l'exactitude de ces machines-outils.

Génie mécanique, automobile, énergie renouvelable... l'industrie est dans une recherche continue pour augmenter son efficacité et réduire ses coûts. « *Il faut de plus en plus de techniques de mesure de haute exactitude, robustes face à des conditions environnementales difficiles et qui donnent une réponse instantanée au cours du processus de fabrication* », explique Hichem Nouira, chercheur au LNE-LCM. En particulier pour améliorer la qualité de fabrication, et dans le cadre de l'usine 4.0 munie d'unités flexibles entièrement automatisées et connectées...

DES CAPTEURS POUR CONTRÔLER EN LIGNE

Comment, alors, pour les tests de conformité aux tolérances spécifiées, contrôler rapidement et avec une grande exactitude les pièces fabriquées sur les machines-outils ? Et ce directement au niveau de leur fabrication, c'est-à-dire alors que la pièce usinée est encore bridée sur la machine.

Les incertitudes de mesure doivent être réduites à quelques micromètres sur le volume de la pièce. L'idée est de faire du contrôle en ligne en intégrant un capteur, ce qui permettra aussi de qualifier plus facilement la machine. Le projet européen « Mesure dimensionnelle traçable en ligne » (2013-2016) a permis l'incorporation d'une métrologie dimensionnelle traçable directement sur les machines-outils.

Pour satisfaire aux exigences de la production mécanique, en particulier dans l'objectif de l'usine du futur, les incertitudes de mesure in situ dans une machine-outil devront être réduites à quelques micromètres sur le volume de travail. "

Hichem Nouira, chercheur au LNE-LCM.

UN ÉTALON ORIGINAL POUR LES DÉFAUTS VOLUMÉTRIQUES

Le LNE-LCM et le LURPA ont travaillé ensemble sur la caractérisation géométrique d'une machine-outil 5-axes à commandes numériques (CNC). Celle-ci a été équipée d'un système embarqué métrologique pour les mesures dimensionnelles de la pièce fabriquée. Les mesures sont effectuées par un système de palpation tactile fixé à un porte-outil. Le LNE-LCM et le LURPA ont développé un étalon original doté de barres horizontales, ce qui permet de mesurer les défauts de justesse de l'équipement (l'écart par rapport à une valeur de référence), les défauts de rectitude et d'inclinaison. Ils ont également exploité l'utilisation d'un laser *tracer* pour la caractérisation de la même machine-outil.

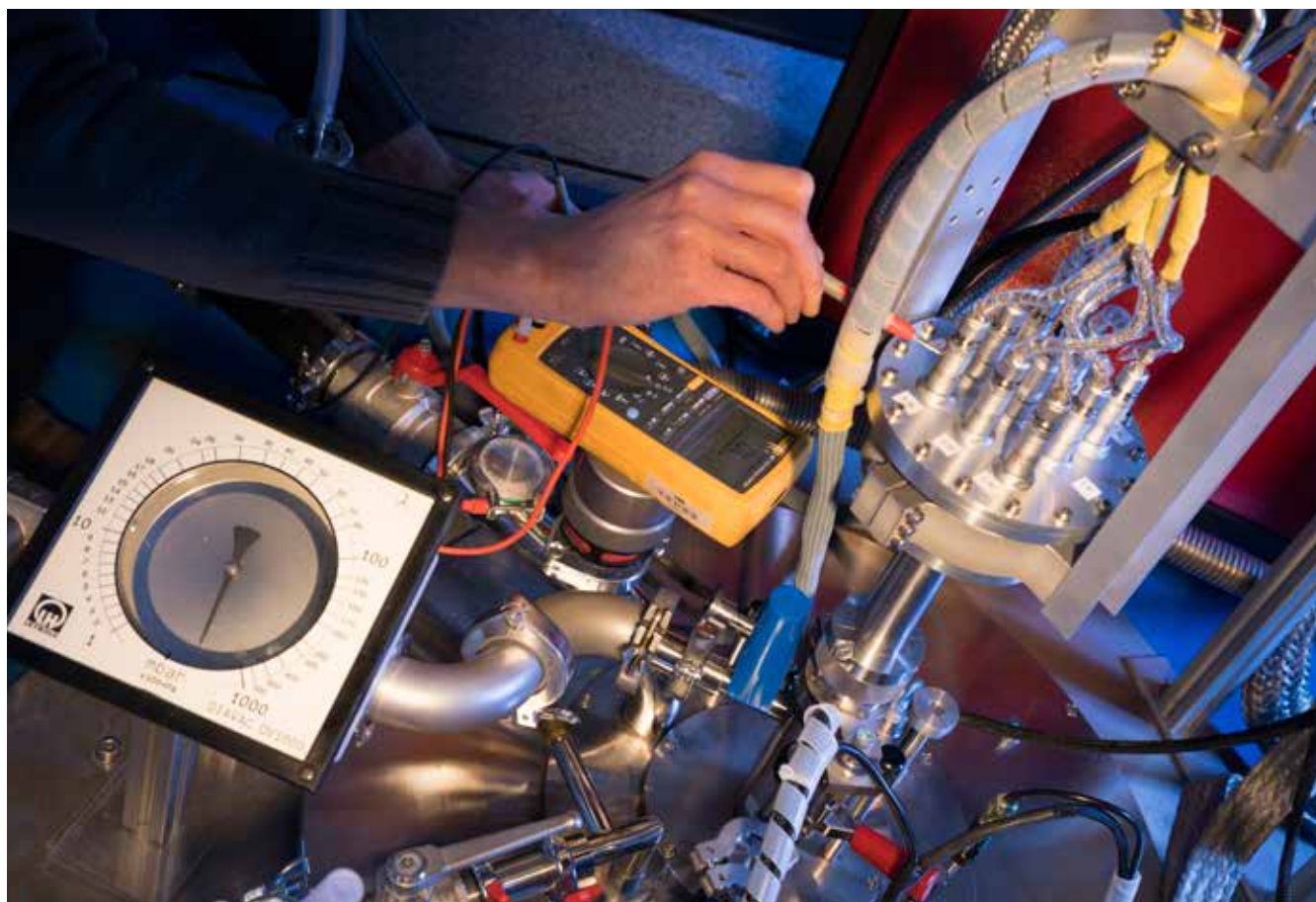
Les laboratoires ont aussi créé une machine virtuelle qui permet d'effectuer des simulations pour anticiper les défauts. « *De nouveaux projets sont en cours pour le même type de qualification sur les robots industriels usine 4.0* », annonce Hichem Nouira.



Qualification d'une machine-outil à commande numérique via une barre à trous améliorée.

Ce qu'il faut retenir

Améliorer la qualité de fabrication de pièces complexes usinées directement en atelier permettra de réduire les pertes et les coûts et d'économiser sur la consommation d'énergie.



LES AVANCÉES SCIENTIFIQUES DU RÉSEAU NATIONAL DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE



NANO-OBJETS

UNE NOUVELLE TECHNIQUE POUR LA CARACTÉRISATION MÉTROLOGIQUE

Bien comprendre les propriétés des nano-objets qui envahissent notre quotidien, c'est d'abord établir une mesure fiable de leurs propriétés, notamment la distribution en taille. Le LNE a mis au point une nouvelle technique pour la caractérisation métrologique des nanoparticules.

Quelles sont les propriétés des nano-objets ? Comment concevoir de nouveaux nanomatériaux pour des applications qui interviennent désormais dans des domaines toujours plus variés ? Pour bien comprendre leurs propriétés, une mesure fiable de la distribution en taille des nano-objets est primordiale. La taille est en effet un facteur déterminant pour évaluer notamment la toxicité, car elle influence directement les phénomènes de bioaccumulation ou le transport à travers la barrière hémato-encéphalique (barrière isolant la circulation sanguine du système nerveux central). Dès lors, comment mesurer les nano-objets de façon juste et fiable ?

FRACTIONNEMENT PAR COUPLAGE FLUX-FORCE HYDRAULIQUE

« Le LNE développe des compétences techniques et de nouveaux moyens analytiques de caractérisation des nano-objets », explique Enrica Alasonati, chercheuse au LNE. Depuis 2015, le laboratoire travaille précisément sur des techniques de caractérisation physico-chimique basées sur l'analyse élémentaire par SP-ICP-MS (spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif en mode *single particle* basée sur une détection extrêmement sensible), et sur des techniques de séparation et fractionnement par couplage flux-force hydraulique (FFF).

Ces dernières permettent de séparer les particules constituant le matériau en fonction de leur coefficient de

Face à l'essor des nano-objets, il est indispensable d'avoir des techniques de mesure complémentaires pour une métrologie de référence en vue de caractériser ces matériaux du futur..."

Enrica Alasonati, chercheuse au LNE - Pôle Chimie et Biologie.

diffusion. La technique est ainsi capable de fractionner des objets dans un intervalle de 10^3 g mol⁻¹ à 10^5 g mol⁻¹, et pour des particules avec des diamètres compris entre 1 nm et 100 µm, couvrant ainsi le domaine des colloïdes et la majeure partie des microparticules et nanoparticules. Aucune autre technique de fractionnement n'est par ailleurs en mesure de couvrir le cas des mélanges complexes.

Le projet qui vise à la mise au point d'une technique complémentaire à la microscopie électronique pour la caractérisation métrologique des nanoparticules est en cours. « Grâce à sa sélectivité, sa haute résolution, sa sensibilité, son exactitude et son grand nombre d'applications possibles, la technique permettra de fournir des méthodes de référence validées pour la caractérisation des nano-objets manufacturés dans le futur... », conclut Enrica Alasonati.

Ce qu'il faut retenir

Le projet exploite le fractionnement par couplage flux-force hydraulique associé à la diffusion statique de la lumière et la spectrométrie de masse en mode *single particle* pour mieux mesurer les nano-objets.



Plateforme de caractérisation des nano-objets en phase liquide du LNE : chaîne A4F et ses détecteurs UV, réfractomètre et diffusion de lumière, MALS

SPECTROMÉTRIE DÉVELOPPER DES CALORIMÈTRES MAGNÉTIQUES POUR LA SPECTROMÉTRIE X ET BÊTA

Radioprotection dans le nucléaire, dosage en médecine nucléaire, cycle du combustible... Les enjeux sociétaux et économiques liés aux radio-isotopes, et aux rayonnements ionisants qu'ils émettent, sont variés et importants. Le besoin d'étalonnage des appareils de mesure de ces rayonnements est constant, car au service des utilisateurs médecins, ingénieurs ou techniciens.

Les radio-isotopes se caractérisent par les rayonnements émis, X, gamma, bêta... La spectrométrie X et bêta se définit comme une technique d'analyse consistant à mesurer précisément l'énergie de chaque rayonnement, ou particule émise, les rayons X pour l'une, et le rayonnement bêta pour l'autre. Les enjeux sont variés, de la radioprotection où il faut étalonner des instruments de mesure, à l'usage des rayonnements ionisants dans certains traitements de soins pour lesquels le dosage nécessite d'étalonner, ou le contrôle du traité de non-prolifération de matières fissiles.

Les radio-isotopes utilisés, aussi bien sur les sites industriels ou nucléaires que dans les hôpitaux, sont encadrés par des normes et une réglementation stricte. Le besoin en métrologie, consistant à fournir des étalons aux utilisateurs, à améliorer les étalons, ainsi que des données tabulées caractéristiques des radio-isotopes, reste une préoccupation constante des spécialistes comme le LNE-LNHB.

LES CALORIMÈTRES MAGNÉTIQUES DES SPECTROMÈTRES TRÈS HAUTE RÉSOLUTION EN ÉNERGIE

Avec un projet, mené de 2013 à 2016, consistant à développer des calorimètres magnétiques pour la spectrométrie X et bêta, le LNE-LNHB a travaillé sur des détecteurs cryogéniques. Précisément, ces calorimètres magnétiques permettent d'atteindre des performances supérieures à celles des détecteurs conventionnels dans plusieurs domaines de la métrologie des rayonnements

ionisants. Ils ont été développés pour deux types de mesures : la spectrométrie des photons X dans la gamme d'énergie 1 keV à 25 keV, et la spectrométrie bêta.

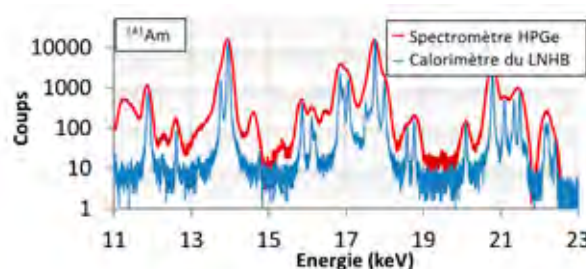
Les détecteurs à semi-conducteur généralement utilisés en spectrométrie X ont une résolution en énergie insuffisante pour séparer les nombreuses raies présentes dans des spectres X complexes des actinides par exemple. Et les détecteurs actuels en spectrométrie bêta, c'est-à-dire les spectromètres magnétiques et électrostatiques, sont des installations lourdes et difficiles à manipuler, et il en reste très peu dans le monde. Par ailleurs, ils exigent des temps de mesure très longs ou des sources intenses avec leurs problèmes d'auto-absorption.

Les calorimètres magnétiques développés dans ce projet sont plus performants, et permettent « une mesure des spectres X et bêta, avec une très bonne résolution, une excellente linéarité en énergie et un rendement intrinsèque élevé », annonce Matias Rodrigues.

L'objectif du projet était double. D'une part, mesurer des intensités d'émission X avec une incertitude très faible, inférieure à 0,5 %. Et d'autre part, mesurer la forme des spectres bêta avec un seuil de détection en énergie très bas et un rendement de détection de 100 %. Ces exigences ont d'ores et déjà été atteintes.

Nous devons améliorer les précisions et réduire les incertitudes en développant des spectromètres X et bêta pour assurer la traçabilité des mesures dans un but de fiabilité et de sécurité."

Matias Rodrigues, chercheur au LNE-LNHB/CEA.



Comparaison des spectres de photons X émis par une source d'Am-241 mesurés avec un détecteur conventionnel HPGe (rouge) et avec le calorimètre magnétique haute résolution développé au LNHB (bleu)

Ce qu'il faut retenir

Les détecteurs cryogéniques, en l'occurrence les calorimètres magnétiques, permettent d'atteindre des performances supérieures à celles des détecteurs conventionnels, dans plusieurs domaines de la métrologie des rayonnements ionisants.

MATHÉMATIQUES ET STATISTIQUES

MATHMET, PREMIÈRE PLATEFORME EUROPÉENNE DE MÉTROLOGIE DÉDIÉE

Avec la création de cette première plateforme européenne de métrologie dédiée aux mathématiques et aux statistiques MATHMET, l'Europe se dote d'un outil pour apporter plus de visibilité et de poids à ces disciplines indispensables à la métrologie d'aujourd'hui.

Lieu d'échange et de partage, carrefour de la métrologie collaborative, initiative complémentaire des laboratoires nationaux... MATHMET est une plateforme européenne pour les spécialistes de la métrologie, du monde académique et de l'industrie, entièrement dédiée à la recherche en mathématiques et en statistiques au service de la métrologie. Ce centre virtuel de recherche, créé en 2016, est composé des principaux laboratoires européens de métrologie tels que le LNE, la PTB en Allemagne, le NPL au Royaume-Uni et SP en Suède. D'autres laboratoires nationaux sont d'ores et déjà candidats pour le rejoindre. Concrètement, doté d'un site internet et d'un secrétariat mais fonctionnant en plateforme virtuelle et collaborative, MATHMET a pour but de concevoir, fournir et diffuser des outils mathématiques pour la métrologie. « Il s'agit de promouvoir les bonnes pratiques mathématiques et statistiques en métrologie en Europe, de rendre plus

visibles nos actions, la contribution de la métrologie notamment vers l'industrie et nos interactions avec la communauté académique », explique Nicolas Fischer, statisticien au LNE et vice-président de MATHMET.

FÉDÉRER LES RESSOURCES EUROPÉENNES

« En mathématiques, les petites équipes nationales ont décidé de se fédérer au niveau européen et de renforcer les liens entre instituts pour faciliter les collaborations entre laboratoires », précise Nicolas Fischer. Un chiffre : au LNE, l'équipe de mathématiques rassemble moins d'une dizaine de personnes. « MATHMET réunit déjà près de 60 personnes et propose un panel d'outils et de méthodes plus large... ». Au quotidien, MATHMET va offrir de nouvelles solutions en fédérant ainsi les ressources européennes, et en facilitant la résolution de problématiques de mesures nécessitant l'usage ou le développement d'outils mathématiques par la mise à disposition, par exemple, de guides, de logiciels, de formations, de partenariats, de recherches collaboratives...

Les chercheurs spécialisés en mathématiques et en statistiques pour la métrologie avaient besoin d'un lieu d'échanges et de diffusion, complémentaire des laboratoires nationaux."

Nicolas Fischer, statisticien au LNE.

Ce qu'il faut retenir

MATHMET a pour vocation d'améliorer la visibilité des mathématiques et des statistiques dans le domaine de la métrologie européenne. Ce centre doit favoriser la collaboration entre instituts européens de métrologie et permettre une mutualisation des ressources et des compétences pour le développement de nouveaux outils pouvant répondre aux besoins des différents domaines de la métrologie.



HORLOGE OPTIQUE QUAND UN LASER REDÉFINIT LA SECONDE

Dans le cadre de la future redéfinition de la seconde en termes de fréquences optiques et non plus d'oscillations de l'atome de césium, une équipe du LNE-SYRTE a mis au point une méthode innovante pour la stabilisation de fréquences des lasers utilisés pour sonder les transitions optiques. Et augmenter ainsi la précision de la mesure.

Une redéfinition d'ensemble des unités du SI (système international d'unités) est en cours dans différents laboratoires de métrologie de par le monde. Celle concernant la seconde doit être concrétisée d'ici à 2025. Parmi les pistes étudiées : les horloges optiques, qui devraient permettre de sortir de la définition actuelle car on a atteint une limite de précision.

« *Il faut changer d'étalon et passer dans le domaine optique* », résume Yann Le Coq, ingénieur de recherche CNRS au sein de l'unité LNE-SYRTE (Systèmes de référence temps-espace) à l'Observatoire de Paris.

DES HORLOGES OPTIQUES POUR UNE DÉFINITION PLUS PRÉCISE

Depuis 1967, la seconde est définie à partir de la fréquence de résonance d'une transition énergétique de l'atome de césium (9,2 GHz), en mesurant des oscillations (9 192 631 770 exactement) de l'atome de césium à l'aide d'horloges atomiques.

Il s'agit désormais de mesurer la fréquence d'une transition optique dans des atomes de strontium. Cette nouvelle approche, née il y a une dizaine d'années, consiste à confiner des atomes dans un « piège de lumière », appelé réseau optique, et à étudier avec des lasers leur transition à des fréquences plus élevées (1 015 Hz). Le CNRS, avec le LNE-SYRTE, a ainsi construit deux horloges « optiques » fonctionnant avec des atomes de strontium. Des horloges qui ont des résultats parfaitement « traçables » sur le plan métrologique quand on les compare aux actuels étalons primaires au césium, mais promettent une meilleure précision (à 16 chiffres, donc de 10^{-16}), surclassant ainsi la définition actuelle de la seconde.

Ce qu'il faut retenir

Ce projet s'inscrit dans le cadre des travaux sur les horloges optiques, domaine d'avenir de la métrologie des fréquences et du temps. L'objectif de la communauté métrologique internationale étant d'aboutir à une redéfinition de la seconde en termes de fréquences optiques d'ici à quelques années.



Gros plan du cœur d'une horloge optique à atomes de strontium.

DES LASERS PLUS FIABLES

Cependant, pour y parvenir, les performances de ces horloges optiques restent encore à améliorer. En cause, les lasers utilisés pour l'interrogation des transitions atomiques, car ils présentent des problèmes de stabilité de fréquences. « *C'est dans ce cadre général que s'est déroulé notre programme PALEMC (projet d'asservissement laser sur l'euporium en matrice cristalline)* », explique Yann Le Coq. « *Mené de 2013 à 2016, il traduit la montée en puissance de ces horloges optiques et vise à les perfectionner.* »

Concrètement, le LNE-SYRTE a mis au point un laser dit « sur trous brûlés spectraux », et avec lui une méthode innovante pour cette stabilisation de fréquences. Cela pourrait permettre d'améliorer significativement la précision des horloges optiques actuelles.

La majeure partie du système expérimental est en place au LNE-SYRTE, et les travaux menés ont d'ores et déjà permis d'obtenir des précisions de l'ordre de 10^{-14} . D'autres études sont en cours dans le cadre du projet LASTRAHO qui fait suite à PALEMC, afin d'identifier les facteurs limitant et en vue d'améliorer la précision à 10^{-17} ... voire mieux !

Il faut changer d'étalon pour la seconde ! Nous cherchons à passer de l'atome de césium, qui a atteint sa limite de précision, à une définition optique.

Yann Le Coq, ingénieur de recherche CNRS au sein du LNE-SYRTE.

ACTIVITÉ DES RADIONUCLÉIDES AMÉLIORER LES RÉFÉRENCES AU SERVICE DE LA MÉDECINE NUCLÉAIRE

Au service de la médecine, les chercheurs en métrologie veulent mieux connaître les processus de comptage à l'origine de la mesure d'activité des radiopharmaceutiques. Le LNE-LNHB a développé un outil de simulation pour améliorer le degré de confiance des incertitudes de mesure.

L'enjeu est à la fois scientifique et métrologique. Il s'agit de mieux appréhender l'activité des radionucléides par un outil de mesures sans biais. Le but : améliorer le degré de confiance des références au service de la médecine nucléaire.

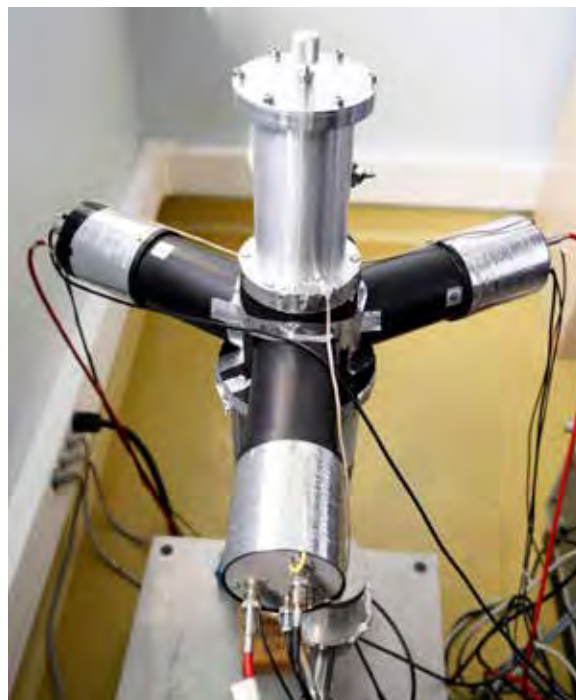
Les chercheurs en métrologie souhaitent avoir une meilleure connaissance des processus de comptage des radionucléides utilisés. Des compteurs spécifiques à cette tâche font partie de l'instrumentation fondamentale en métrologie de l'activité pour la mesure des radiopharmaceutiques utilisés par les médecins nucléaires et les physiciens d'hôpitaux pour certains traitements. « *Nous voulons être plus prédictifs sur certaines mesures* », précise Christophe Bobin, ingénieur chercheur au LNE-LNHB.

MESURER AVEC UN COMPTEUR RCTD

On utilise pour cela des méthodes de mesure par « compteur RCTD », rapport des coïncidences triples à doubles. Une méthode de comptage qui mesure une émission lumineuse dans certaines conditions que l'on appelle scintillation liquide.

Le travail des équipes du LNE-LNHB, impliquées dans le projet « Application de la simulation rayonnement-matière aux méthodes de mesure RCTD et des coïncidences $4\pi\beta\text{-}\gamma$ » (2013-2016), a permis d'améliorer sensiblement l'instrumentation dans ce domaine. Est utilisé précisément un compteur doté de trois photomultiplicateurs entre lesquels on place un liquide scintillant qui illumine les multiplicateurs. Lesquels mesurent alors le rayonnement lumineux.

Le projet a étudié des conditions d'utilisation du modèle RCTD «classique» pour la mesure d'activité de radionucléides émetteurs de basses énergies, notamment



Mesure primaire de l'activité (avec 3 photomultiplicateurs) de microsphères marquées avec ^{90}Y , au LNE-LNHB.

afin de prévoir l'influence du phénomène de dépendance entre les photomultiplicateurs qui peut perturber la mesure. Une modification de ce modèle RCTD, dite « statistique », pour prendre en compte cet effet, a aussi été proposée. La réponse lumineuse des scintillateurs a été évaluée expérimentalement.

Le but était de disposer d'un outil de simulation pour améliorer le degré de confiance des incertitudes de mesure. Résultat atteint ! L'outil va maintenant être amélioré, et confronté par inter-comparaisons avec d'autres laboratoires de métrologie du monde. « *Un travail typiquement au cœur de notre mission de métrologues : mieux connaître l'instrumentation* », termine Christophe Bobin.

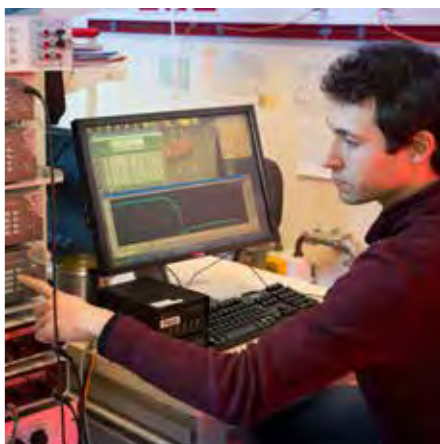
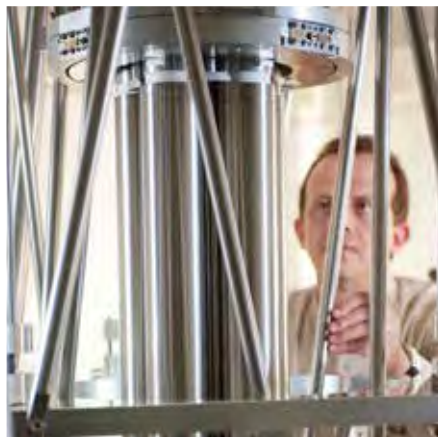
Ce qu'il faut retenir

Le LNE a permis d'améliorer sensiblement l'instrumentation dans le domaine du comptage des radionucléides.

Nous voulons être plus prédictifs dans les mesures d'activité avec l'instrumentation nucléaire utilisée pour les radiopharmaceutiques, manipulés par des médecins nucléaires et des physiciens d'hôpitaux pour certains traitements.

Christophe Bobin, ingénieur chercheur au LNE-LNHB.

PORTRAITS DE CHERCHEURS



CPEM 2018 : le LNE dans les starting-blocks

En 2016, le LNE a participé à la *Conference on Precision Electromagnetic Measurements* (CPEM) à Ottawa, un événement majeur dans le domaine des mesures électromagnétiques de très haute précision.

Les travaux présentés par le LNE concernent ses avancées sur des sujets tels que le graphène, la balance du watt, les capteurs de courant à base de fibre optique, les mesures d'impédance à haute fréquence, la métrologie associée aux analyseurs de réseau vectoriel Mais le LNE s'est également lancé dans la préparation de CPEM 2018, qu'il organisera à Paris avec l'Observatoire de Paris et le CNRS. La conférence permettra à 500 experts

internationaux d'échanger sur les derniers progrès effectués pour relever les défis liés à l'énergie, aux TIC, à l'ingénierie quantique, à l'industrie 4.0...

En écho à l'actualité de la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) sur la révision du Système international d'unités (SI) en 2018, elle mettra aussi à l'honneur les dispositifs quantiques qui relient les étalons de mesure électriques aux constantes fondamentales.

CONFERENCE ON PRECISION ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

PARIS • FRANCE

July 8 -13, 2018



Rédaction : Contenteo / LNE - Réalisation : LNE

Crédits photos : Philippe Stroppa : p. 3, 16, 24, 35, 40 - Guillaume Grandin : p. 1, 6, 17, 18, 28, 32, 34, 40 - LNE : p. 4, 8, 12, 19, 25, 29, 31, 33, 37 - LNE-Cnam : p. 21 - LNE-LNHB : p. 13, 14, 36, 39 - Anna Bencsik (Anses) : p. 15 - Younes Boukellal : p. 22 - Université de Rennes 1 : p. 30 - LNE-SYRTE/Rodolphe Le Targat : p. 38 - IstockPhotos : p. 26 - Fotolia : p. 23 - ThinkstockPhotos : p. 11, 20, 27 - DR

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



LNE

Laboratoire national de métrologie et d'essais

1, Rue Gaston Boissier
75724 Paris Cedex 15
info@lne.fr



www.lne.fr
www.metrologie-francaise.fr

