



la métrologie française
**AU CŒUR DU
PROGRÈS**



SOMMAIRE

Au cœur d'une dynamique internationale

Au cœur de la connaissance

Quand électrique rime avec quantique

Une unité de masse dématérialisée

Cap sur les références de temps et de fréquences du futur

Vers une nouvelle définition du kelvin

Au cœur de l'innovation

Galileo, un projet majeur de l'Union européenne

Une mesure fiable jusqu'à 3 000 °C

Quand la métrologie voit grand

Des matériaux mieux caractérisés

Rotation-accélération : vers des mesures plus fines

Au cœur de la performance

Les LED en voient de toutes les couleurs

Un contrôle rapproché des fuites de gaz frigorigènes

Des références à l'échelle nanométrique

Un pas de plus vers la maîtrise des radionucléides

Des micro-nanosystèmes pour l'industrie et la recherche

Au cœur de la santé

La radiothérapie, plus pointue pour plus de sérénité

Mieux quantifier les légionelles

Un diagnostic plus fiable de l'insuffisance rénale chronique

Analyser le souffle et ses biomarqueurs

Sonder les propriétés structurales des molécules

Au cœur du développement durable

Aquaref, un pilier de la surveillance de l'eau

Champs électromagnétiques : des seuils réellement respectés

Des méthodes de référence pour déterminer les pesticides

Garantir la qualité de l'air intérieur

Accompagner l'encadrement du nucléaire

α

p. 4

p. 6

p. 8

p. 10

p. 12

p. 14

ÉDITO / ENSEMBLE FACE AUX DÉFIS DU PROGRÈS

λ Qu'elle soit d'intérêt scientifique, économique ou sociétal, la mesure est indissociable de l'activité humaine. Et, pour qu'elle soit la plus utile possible, les métrologues doivent en permanence se tenir à l'écoute de leur environnement : progrès scientifiques, nouvelles technologies, évolution des besoins, réglementation... tous impliquent un besoin croissant d'exactitude et un réel élargissement des connaissances en métrologie.

Seul un effort soutenu de recherche et développement peut faire évoluer les méthodes, les instruments et les étalons à la hauteur des défis contemporains. Et c'est là l'ambition majeure du réseau de la métrologie française. Constitué d'une dizaine de laboratoires de référence et piloté par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), ce réseau offre une multitude de compétences complémentaires, reconnues à l'échelle internationale – notamment dans le cadre du Programme européen de recherche en métrologie (EMRP).

Chaque jour, ses chercheurs relèvent de nouveaux défis dans des champs prioritaires, comme la médecine clinique, les nanotechnologies, la protection de l'environnement ou encore la navigation spatiale. Leurs innovations aideront les industriels à intégrer les nouvelles technologies, mais elles constitueront aussi, plus largement, un vecteur de sécurité pour la société.

Ces hommes et ces femmes améliorent notre compréhension du monde et nous permettent de repousser nos frontières. Ensemble, ils contribuent à mettre en place des données fiables, sur lesquelles bâtir nos règles et nos politiques. Ensemble, ils aident l'industrie et la société à construire leur avenir.



LUC ERARD /

directeur de la recherche scientifique et technologique du LNE



MAGUELONNE CHAMBON /

directrice de la recherche scientifique et technologique du LNE (juillet 2010)



PIERRE GUILLON /

président du Comité de la métrologie

AU CŒUR D'UNE DYNAMIQUE

DANS UN CONTEXTE MARQUÉ PAR L'ÉMERGENCE DES TECHNOLOGIES INNOVANTES, PAR DES ENJEUX SOCIÉTAUX ACCRUS ET PAR L'ACCROISSEMENT DES ÉCHANGES ÉCONOMIQUES, LA MÉTROLOGIE DOIT OPTIMISER SES PERFORMANCES POUR ASSURER UNE MEILLEURE TRAÇABILITÉ DES MESURES DANS TOUS LES DOMAINES. C'EST PLUS QUE JAMAIS À L'ÉCHELLE INTERNATIONALE, NOTAMMENT EUROPÉENNE, QUE LES SCIENTIFIQUES MÈNENT LEURS RECHERCHES. UN PÉRIMÈTRE QUE LE RÉSEAU DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE A PARFAITEMENT INTÉGRÉ.

La Convention du Mètre est le traité diplomatique qui a créé, en 1875, le Bureau international des poids et mesures (BIPM), organisation intergouvernementale placée sous l'autorité de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) et supervisée par le Comité international des poids et mesures (CIPM). Depuis, de très nombreux pays ont mis en œuvre leur propre système de métrologie avec la réalisation d'étalons de mesure indispensables à la société. En France, le réseau de métrologie réunit quatre laboratoires au sein du CNAM, du CEA, de l'Observatoire de Paris et du LNE, ainsi que six laboratoires associés au LNE. Ce réseau est piloté par le LNE depuis 2005.

L'exactitude en ligne de mire

Pour assurer ses fonctions, le réseau s'appuie sur le Comité de la métrologie. Composée de personnalités du milieu scientifique et industriel ainsi que de représentants des ministères en charge de l'Industrie et de la Recherche, cette instance émet des recommandations sur les orientations scientifiques et stratégiques à suivre. Elle est secondée par plusieurs conseils scientifiques et par la Direction de la recherche scientifique et technologique (DRST) du LNE, notamment pour l'évaluation et la coordination des projets.

Le réseau de la métrologie française a pour principale mission de mettre en œuvre les unités du système international, au meilleur niveau d'exactitude possible, en réalisant et en améliorant des étalons de référence et de transfert, et en développant des moyens et méthodes de référence pour toutes les grandeurs. Cela doit permettre aux acteurs économiques d'accéder aux références métrologiques dont ils ont besoin.

La qualité des travaux scientifiques effectués au sein du réseau est validée par l'organisation de comparaisons

interlaboratoires, que ce soit au niveau européen (dans le cadre d'Euramet) ou au niveau international (dans le cadre du CIPM) ; comparaisons indispensables pour valoriser et promouvoir les recherches réalisées, mais aussi pour fonder une confiance réciproque avec les laboratoires de métrologie étrangers, les différents acteurs économiques et les organismes en charge de la réglementation.

La recherche mutualisée face à des enjeux communs

Avec la mondialisation accélérée des échanges, la complexité croissante des technologies et l'apparition de nouveaux besoins sociétaux, les acteurs mondiaux de la métrologie ont éprouvé la nécessité de s'organiser sur des périmètres plus vastes que le simple territoire national. Dans les années 1980-1990, des organisations régionales de métrologie se sont créées (RMO), regroupant les instituts nationaux de métrologie (voir planisphère ci-contre) ; des pays non membres de la Convention du mètre pouvant aussi adhérer à ces associations. Leurs objectifs : organiser des comparaisons interlaboratoires, faciliter les raccordements au sein d'une même région, optimiser les instrumentations de haute technicité, favoriser la collaboration scientifique, le développement des infrastructures métrologiques et les formations. Une particularité d'Euramet, RMO européenne qui regroupe les laboratoires de 34 pays, est l'élaboration d'un programme commun de recherche en métrologie, l'EMRP (European Metrology Research Programme), avec pour ambition d'obtenir des financements de l'Union européenne. L'article 169/EMRP, adopté en juillet 2009 par la Commission européenne, va permettre de financer des programmes de recherche en métrologie pour Euramet, sur sept ans, au niveau de 400 millions d'euros.

INTERNATIONALE

4

LABORATOIRES NATIONAUX DE MÉTROLOGIE

/ LNE – Laboratoire national de métrologie et d'essais
Domaines : chimie et biologie, dimensionnel, électricité-magnétisme, masse et grandeurs apparentées, mathématiques et statistiques pour la métrologie, nanométrie, rayonnements optiques, température et grandeurs thermiques

/ LNE-INM/CNAM – Institut national de métrologie / Conservatoire national des arts et métiers
Domaines : longueur, masse, rayonnements optiques, température

/ LNE-LNHB/CEA – Laboratoire national Henri-Becquerel / Commissariat à l'énergie atomique
Domaine : rayonnements ionisants (dosimétrie et activité)

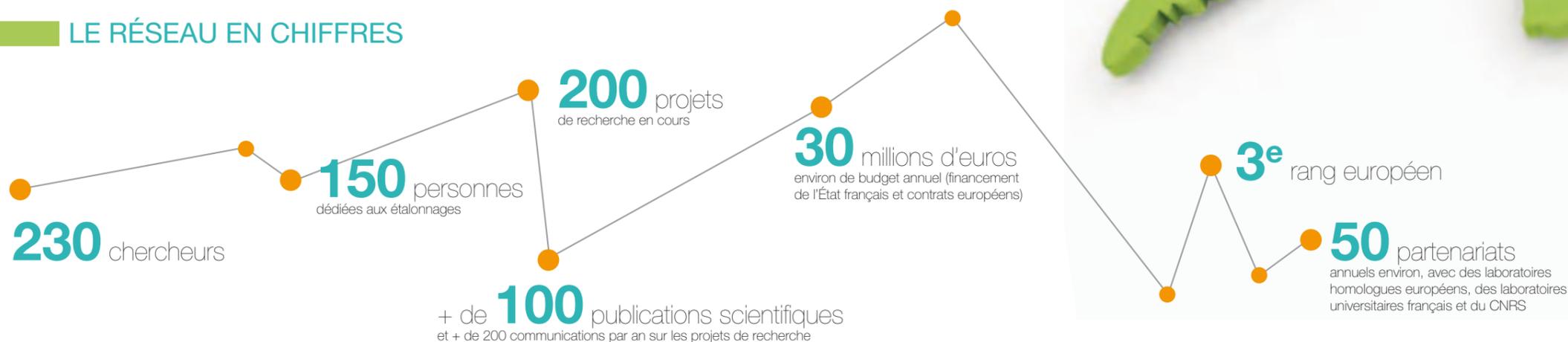
/ LNE-SYRTE/OP – Systèmes de référence temps-espace / Observatoire de Paris
Domaines : temps, fréquences, gravimétrie

6 laboratoires associés pour des domaines ciblés :

LNE-ENSAM (pression dynamique) ; **LNE-IRSN** (dosimétrie des neutrons) ; **LNE-CETIAT** (hygrométrie, débitmétrie liquide et anémométrie) ; **LNE-LTFB** (temps-fréquences) ; **LNE-LADG** (débitmétrie gazeuse) ; **LNE-Trapil** (débitmétrie des hydrocarbures).



LE RÉSEAU EN CHIFFRES



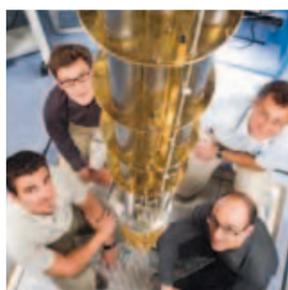
CONVENTION DU MÈTRE : UNE TRAÇABILITÉ ASSURÉE AU NIVEAU MONDIAL

La CGPM a adopté, en 1960, le nom de « système international d'unités », le SI. Ce système est actuellement basé sur sept unités de mesure. Chacune peut être représentée et réalisée par une référence, appelée « étalon », qui est ensuite déclinée en étalon primaire, secondaire ou de travail. Afin de fournir à la société et à l'industrie des informations quantitatives et fiables sur les services proposés par les laboratoires de métrologie, le CIPM a élaboré un arrangement de reconnaissance mutuelle des certificats d'étalonnage et de mesurage, le CIPM-MRA. Cet arrangement a été signé par 72 États (dont la France en 1999) et deux organisations internationales. Il permet d'offrir une assurance de la traçabilité des mesures, complémentaire aux accords établis entre organismes d'accréditation.

AU CŒUR DE LA CONNAISSANCE

EN L'ESPACE DE QUELQUES DIZAINES D'ANNÉES, DE NOMBREUSES DÉCOUVERTES EN PHYSIQUE QUANTIQUE ASSOCIÉES À DE NOUVELLES TECHNOLOGIES ONT IMPOSÉ UN NOUVEAU CADRE À LA MÉTROLOGIE FONDAMENTALE. SOUCIEUX DE RESTAURER LA COHÉRENCE DU SYSTÈME INTERNATIONAL, LES MÉTROLOGUES ENVISAGENT DE RACCORDER SES UNITÉS DE MESURE À DES CONSTANTES FONDAMENTALES. OBJECTIFS : DÉMATÉRIALISER LES UNITÉS ET LES PÉRENNISER.

QUAND ÉLECTRIQUE RIME AVEC QUANTIQUE



Une partie de l'équipe projet Triangle métrologique.
De g. à dr. : Olivier Seron, Nicolas Feltin, Wilfrid Poirier et Laurent Devoille.

Quels sont les enjeux du projet ?

Le LNE travaille depuis trois ans sur l'expérience du triangle métrologique, qui consiste à vérifier la cohérence des trois constantes impliquées dans les phénomènes quantiques étudiés en métrologie électrique fondamentale : l'effet Josephson et l'effet Hall quantique – déjà utilisés respectivement pour la conservation des unités de tension (volt) et de résistance (ohm) –, ainsi que l'effet tunnel à un électron, dont l'étude a pour but de réaliser un étalon de l'ampère. Initiée dans le cadre de la refonte à venir du système international d'unités, cette expérience devrait apporter une contribution significative à la redéfinition des unités électriques à partir des constantes fondamentales h et e . Plusieurs acteurs nationaux sont mobilisés sur ce projet : le Laboratoire de photonique et de nanostructure du CNRS à Marcoussis et le CEA-Grenoble pour la fabrication d'échantillons, et le groupe Quantronique du CEA-Saclay pour son appui scientifique.

Quel premier bilan peut-on dresser des travaux engagés ?

Les travaux menés en 2008 ont permis de parvenir à une incertitude relative de $4 \cdot 10^{-6}$ sur la mesure du courant délivré par une pompe à électron métallique.

Quelles sont les perspectives ?

Le prochain objectif à court terme est d'atteindre une incertitude relative de $1 \cdot 10^{-6}$, ce qui suppose de travailler avec des dispositifs capables de délivrer des courants d'intensité plus importante que les valeurs atteintes actuellement (16 pA au maximum). C'est l'objet d'une collaboration initiée avec les laboratoires nationaux de métrologie allemand (PTB) et finlandais (MIKES), qui devrait déboucher sur la fabrication de nouveaux échantillons. Quant à l'incertitude ultime visée par les partenaires du projet, elle s'établit à 10^{-8} .

UNE UNITÉ DE MASSE DÉMATÉRIALISÉE



Une partie de l'équipe projet Balance du watt.
De g. à dr. : Franck Bielsa, François Villar et Gérard Genevès.

Quels sont les enjeux du projet de balance du watt ?

Le kilogramme est défini par le prototype international conservé au BIPM. Mais la quantité de matière qui constitue cet étalon varie au cours du temps, principalement en raison de l'interaction de sa surface avec l'environnement. Cette situation est d'autant plus préjudiciable que de nombreuses grandeurs, dont l'ensemble des grandeurs électriques, dépendent du kilogramme. L'alternative envisagée consiste à raccorder l'unité de masse à une constante fondamentale de la physique – la constante de Planck –, et à déterminer sa valeur avec la plus grande exactitude possible. Il suffira ensuite de fixer la valeur de cette constante et de l'utiliser comme base d'une nouvelle définition du kilogramme, qui devra être validée par la CGPM. Tous les laboratoires pourront ainsi matérialiser leur propre kilogramme.

Quelle méthode a été développée ?

Depuis 2002, le LNE, le LNE-INM, le LNE-SYRTE, ainsi que plusieurs partenaires français et étrangers développent un projet de recherche sur la balance du watt. Ce dispositif électromécanique s'appuie sur deux effets utilisés en métrologie électrique pour caractériser tension et résistance : l'effet Josephson et l'effet Hall quantique. L'objectif est, à partir d'une comparaison de puissances électrique et mécanique virtuelles, de raccorder le kilogramme à la constante de Planck.

Quelles sont les perspectives ?

Le projet de balance du watt, partie intégrante du projet européen e-Mass, dont le LNE assure le pilotage, prévoit la mise à disposition d'un dispositif opérationnel d'ici à 2011. La prochaine étape sera ensuite fixée en 2015, lors d'une réunion de la CGPM, en fonction des résultats obtenus par les différentes expériences de balance du watt développées à travers le monde.

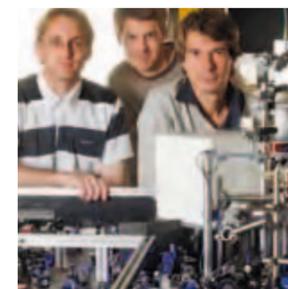
PERSPECTIVES

La métrologie fondamentale évolue sans conteste vers une métrologie quantique, totalement différente de celle que nous connaissons aujourd'hui. Mais le chemin reste encore long. Pour chaque unité, les chercheurs investis dans cette métamorphose vont devoir comparer leurs résultats, se concerter et affiner les stratégies afin d'obtenir les meilleures mesures et les plus faibles incertitudes. En conduisant à l'amélioration des mesures, et donc à celle des performances des chaînes d'étalonnage, ces travaux bénéficieront aux industriels, puis à la société. Se posera alors la question de l'instrumentation : quels outils pour le transfert à l'industrie dans des domaines aussi pointus que le spatial et les nanotechnologies ?



PROJETS

CAP SUR LES RÉFÉRENCES DE TEMPS ET DE FRÉQUENCES DU FUTUR



Une partie de l'équipe projet OCS. De g. à dr. : Jérôme Lodewyck, Philip Westergaard et Pierre Lemonde.

Quels sont les enjeux du projet OCS* ?

Depuis plusieurs années, les horloges micro-ondes se rapprochent de leurs limites ultimes, soit une exactitude avoisinant 10^{-16} . Des horloges dans le domaine des fréquences optiques devraient pouvoir prendre le relais. En effet, la plupart de leurs limitations sont indépendantes en valeur absolue de la fréquence de la transition ; les fréquences optiques étant 10^4 à 10^5 fois plus grandes que les fréquences micro-ondes, l'importance relative de ces limitations est donc considérablement réduite. L'autre perspective ouverte par le développement des horloges optiques est de pouvoir tester plus précisément la stabilité des constantes fondamentales. Pour contribuer à répondre à ces deux enjeux, le LNE-SYRTE participe depuis 2008 à un projet d'horloge optique à atomes de strontium, qui réunit la PTB (Allemagne), l'INRIM (Italie), le NPL (Royaume-Uni) et le MIKES (Finlande).

Quel premier bilan peut-on dresser des travaux engagés ?

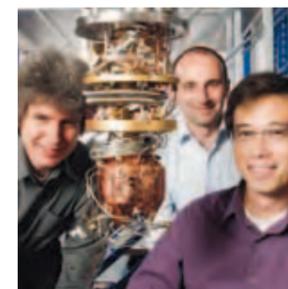
Après avoir démontré la faisabilité d'une horloge optique de haute précision utilisant des atomes froids confinés dans un piège laser, les scientifiques ont précisé ses conditions de fonctionnement. Ils sont également parvenus à une exactitude de fréquences préliminaires de $2 \cdot 10^{-15}$.

Quelles sont les perspectives ?

Le prochain objectif est d'atteindre une résolution de mesure dans la gamme des 10^{-17} , puis d'évaluer l'horloge à ce niveau de performance. Par ailleurs, le LNE-SYRTE cherche à mettre au point, depuis 2005, une horloge optique à atomes de mercure. À ce jour, les résultats obtenus sont la démonstration du refroidissement laser de l'atome de mercure et l'observation combinée à la mesure de fréquences de la transition d'horloge. Reste désormais à atténuer l'effet Doppler – qui constitue l'une des principales limitations aux performances des horloges micro-ondes – en confinant les atomes dans un piège laser.

* Optical Clock for a new definition of the Second

VERS UNE NOUVELLE DÉFINITION DU KELVIN



Une partie de l'équipe projet Constante de Boltzmann.
De g. à dr. : Laurent Pitre, Fernando Sparasci et Daniel Truong.

Quels sont les enjeux du projet ?

La communauté internationale des métrologues cherche à définir le kelvin à partir d'une constante fondamentale, dont la valeur numérique serait figée : il s'agit de la constante de Boltzmann (k), reliée au quantum d'énergie d'agitation thermique kT (T représentant la température thermodynamique).

Quelles méthodes ont été développées ?

Le projet du LNE-INM utilise une méthode de mesure par voie acoustique : la valeur de k est déduite de la mesure de la vitesse du son dans un gaz rare en cavité fermée. Par rapport à la méthode utilisée classiquement, le LNE-INM a introduit des améliorations fondamentales, comme l'utilisation de l'hélium gazeux – dont les propriétés thermophysiques sont mieux connues que celles de l'argon gazeux – et la détermination du volume à l'aide de la résonance micro-ondes.

D'autres méthodes sont en cours d'étude dans des laboratoires français et européens, telles que la méthode spectroscopique, dont on peut déduire la valeur de k , de la mesure d'élargissement Doppler d'une résonance moléculaire optique à l'équilibre thermodynamique, ou encore par la détermination de constantes diélectriques d'un gaz.

Quelles sont les perspectives ?

Les études réalisées sur des prototypes par le LNE-INM ont donné des résultats prometteurs. L'objectif est désormais d'améliorer l'incertitude affectant la détermination de k afin de parvenir à un niveau d'incertitude relative de l'ordre de 10^{-6} , d'ici à fin 2010.

AU CŒUR DE L'INNOVATION

INTÉGRER DE NOUVELLES TECHNOLOGIES ET DE NOUVEAUX PROCESSUS EST UN LEITMOTIV POUR L'INDUSTRIE DE POINTE. ET DANS CE CADRE, VEILLER À LA PRÉCISION ET À LA FIABILITÉ DES MESURES S'AVÈRE ESSENTIEL. UN DÉFI QU'ANTICIPE CHAQUE JOUR LE RÉSEAU DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE, NOTAMMENT AVEC SES RECHERCHES SUR LES HORLOGES ATOMIQUES ET LES TRÈS HAUTES TEMPÉRATURES.

GALILEO, UN PROJET MAJEUR DE L'UNION EUROPÉENNE

Dans le cadre du développement du système européen de navigation par satellite Galileo, le LNE-SYRTE contribue à un projet de métrologie du temps externe. Entretien avec Pierre Uhrich, ingénieur-chercheur, responsable du projet.

Quels sont les enjeux du projet Galileo ?
Le programme Galileo vise à doter l'Europe d'un système de radionavigation par satellite indépendant de son équivalent américain, le GPS. Pour assurer le fonctionnement d'un tel système, le recours à la métrologie temps-fréquences est indispensable. C'est à ce titre qu'un consortium réunissant des entreprises privées et des instituts nationaux de métrologie européens – dont le LNE-SYRTE – a été chargé de réaliser un prototype du fournisseur externe de services en métrologie du temps. Dénommé « Galileo Time Service Provider » (GTSP), ce dernier a pour rôle essentiel de fournir les paramètres de pilotage permettant à l'échelle de temps de référence de Galileo de suivre l'UTC, c'est-à-dire l'échelle de temps civile internationale, modulo 1 seconde.

Quel bilan peut-on dresser des travaux accomplis à ce jour ?

Le prototype du GTSP a été développé avec la contribution de l'ensemble des parties prenantes du consortium et installé au CNES, à Toulouse, en février 2009. Après l'émission des premiers signaux, son évaluation a débuté. Par ailleurs, les 4 laboratoires acteurs du projet fournissent quotidiennement leurs données d'horloge et de comparaison d'horloges à distance, qui serviront à fabriquer la prédiction de l'UTC à partir de laquelle les paramètres de pilotage de l'échelle de temps Galileo seront calculés. Auparavant,

ces données n'étaient transmises qu'au BIPM (Bureau international des poids et mesures) à une fréquence mensuelle : ce changement de rythme a nécessité, notamment, la mise en place de procédures de génération, de validation et de transfert automatiques avec, pour objectif, des résultats de qualité similaire.

Quelles expertises ont été requises dans le cadre de ce projet ?

Pour comparer les horloges des stations impliquées dans le GTSP, nous utilisons deux méthodes : l'une par émission-réception de signaux bidirectionnels vers des satellites de télécommunications, dite « deux-voies », et l'autre fondée sur la réception de signaux GPS, avec un objectif d'incertitude maximale de 5 ns à 1σ . Cela suppose de connaître les retards de propagation des signaux dans les équipements, et donc de procéder à des étalonnages des différentes liaisons. Le LNE-SYRTE a réalisé en 2008 une campagne de mesures GPS dont les résultats sont conformes aux spécifications : l'incertitude des comparaisons GPS obtenue est de 3,2 ns à 1σ . Une fois validé le prototype du GTSP, la prochaine étape consistera à intégrer les données propres à Galileo dans le processus. ■



UNE PARTIE DE L'ÉQUIPE PROJET GALILEO.

De g. à dr. : Pierre Uhrich, Joseph Achkar et Philip Tuckey.

LE PROJET EN BREF

Date de création : juin 2005

Laboratoires impliqués :
LNE-SYRTE, PTB (Allemagne), INRiM (Italie), NPL (Royaume-Uni)

Discipline concernée :
métrologie temps-fréquences

Calendrier :
validation du prototype du GTSP (2009) ; mise en service de Galileo (envisagée pour 2014)

AUTRES PROJETS

4

Ω

Une mesure fiable jusqu'à 3 000 °C

Pour élaborer de nouveaux matériaux ou encore à des fins de recyclage, les industriels du nucléaire, de l'armement et de l'aéronautique, entre autres, recourent à des températures de plus en plus élevées. La connaissance précise de ces dernières est nécessaire pour garantir la qualité des matériaux et limiter les pertes énergétiques. Aussi, le CNAM et le LNE se sont-ils associés pour développer de nouveaux points fixes, et ainsi améliorer, d'un facteur 2 à 5, l'incertitude de réalisation de l'échelle de température dans sa partie la plus haute (de 1 000 °C à 3 000 °C). L'objectif final est d'assurer le transfert de ces nouvelles références vers l'industrie.

Quand la métrologie voit grand

Les activités telles que l'aéronautique et la géologie dépendent de paramètres dimensionnels dont la traçabilité au mètre n'est pas pleinement satisfaisante. Dans le cadre du projet européen « Long Distance », le LNE-INM développe un interféromètre superhétérodyne exploitant la notion de longueur d'onde synthétique qui permet d'obtenir des longueurs d'onde de l'ordre du centimètre, plus propices à la détermination de l'ordre d'interférence tout en réalisant une incertitude de mesure à l'échelle de la dizaine de μm . Par ailleurs, le LNE-INM développe diverses techniques pour mesurer l'indice de l'air sur de grandes distances, notamment par des méthodes spectroscopiques.

Des matériaux mieux caractérisés

Indispensable à de nombreux secteurs industriels, la connaissance des propriétés thermophysiques des matériaux est notamment nécessaire pour accroître les économies d'énergie dans les bâtiments, améliorer l'efficacité des véhicules et des centrales thermiques, et relever les défis propres aux nanotechnologies. Pour répondre à ces différents besoins, le LNE met au point des installations métrologiques permettant de mesurer, entre autres, la diffusivité et la conductivité thermique, ainsi que les propriétés radiatives de tout type de matériau (métaux, céramiques, couches minces, composites...) jusqu'à 1 400 °C.

Rotation-accelération : vers des mesures plus fines

L'interférométrie atomique permet de réaliser des capteurs inertiels (gyromètres et gravimètres) au niveau de l'état de l'art. Pour en améliorer encore les performances, le LNE-SYRTE cherche à mettre au point un gyromètre de très hautes sensibilité et exactitude, qui augmenterait de façon significative l'aire de l'interféromètre. Ce développement pourrait marquer une étape essentielle concernant l'utilisation des capteurs inertiels atomiques dans des environnements moins protégés des vibrations parasites que les laboratoires, notamment pour la géologie, la prospection pétrolière, le guidage-navigation.

PERSPECTIVES

Les recherches menées par le réseau de la métrologie française vont permettre d'améliorer nombre d'applications industrielles, à l'instar du système de navigation Galileo, sur lequel on capitalisera à terme pour faciliter la prédiction des séismes ou l'atterrissage des avions.

Mais les métrologues sont déjà en train de préparer l'étape suivante. Dans le cadre du projet spatial ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) par exemple, le LNE-SYRTE travaille sur l'horloge Pharo. Cette dernière a pour particularité d'utiliser le refroidissement des atomes par laser à un niveau inférieur au microkelvin, menant ainsi à une stabilité de fréquence et à une précision jamais atteintes. Dès 2013, plusieurs de ces horloges de nouvelle génération seront installées dans la station spatiale internationale et comparées à des horloges terrestres.

Plus largement, les signaux des horloges ACES permettront de réaliser des tests d'une précision inédite sur la théorie de la relativité générale d'Einstein et, éventuellement, d'identifier des forces à l'œuvre dans la nature – jusqu'à présent ignorées.

AU CŒUR DE LA PERFORMANCE

EN CROISSANCE RAPIDE, LES NANOSCIENCES ET NANOTECHNOLOGIES REPRÉSENTENT UN DOMAINE DE RECHERCHE STRATÉGIQUE QUE LE RÉSEAU DE LA MÉTROLOGIE FRANÇAISE A SOUHAITÉ INVESTIR, AU PROFIT DE L'INDUSTRIE. C'EST AUSSI POUR ACCOMPAGNER LE MONDE ÉCONOMIQUE FACE AUX ENJEUX SOCIÉTAUX QU'IL S'EST PENCHÉ SUR DE NOUVEAUX SUJETS, COMME LES LED ET LES ÉQUIPEMENTS FRIGORIFIQUES.

LES LED EN VOIENT DE TOUTES LES COULEURS

Pour caractériser l'aptitude des diodes électroluminescentes (LED) de lumière blanche à restituer les couleurs, le LNE-INM cherche à mettre au point un indicateur spécifique en recourant à la métrologie de l'apparence. Entretien avec Annick Razet, professeur des universités au CNAM, responsable du projet.

LE PROJET EN BREF

Date de création : 2007
Laboratoires impliqués : LNE-INM, Muséum national d'histoire naturelle
Disciplines concernées : rayonnements optiques, métrologie de l'apparence
Calendrier : le projet doit s'achever en 2010 et pourra se prolonger par un contrat européen sur le volet énergétique

Quels sont les enjeux associés au projet sur les LED ?

Le secteur de l'éclairage connaît actuellement des évolutions importantes. Face à la nécessité de promouvoir les économies d'énergie dans le cadre du développement durable, les diodes électroluminescentes (LED) de lumière blanche de forte puissance (supérieure à 1 W) sont appelées à remplacer les sources à incandescence conventionnelles. La production de ces nouveaux produits suppose la réalisation d'un ensemble de mesures permettant de déterminer la qualité et la quantité du rayonnement émis.

Quel bilan peut-on dresser des travaux accomplis à ce jour ?

Le LNE-INM a entrepris de caractériser les LED à travers la métrologie de l'apparence, c'est-à-dire en analysant la qualité de la lumière émise. Objectif : élaborer un indicateur de rendu des couleurs spécifique afin de faire évoluer les normes du marché. Notre démarche nécessite la mise en œuvre d'instrumentations et de méthodes permettant de mesurer les grandeurs physiques associées aux LED (répartition spectrale), et de leur associer des mesures visuelles réalisées sur des échantillons de couleurs. La première étape a consisté à effectuer des analyses colorimétriques sur des systèmes d'éclairage émettant en lumière blanche. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur un dispositif composé d'une cabine à lumière,

restituant les conditions expérimentales des mesures visuelles, et d'un spectro-radiomètre à réseau. Grâce à cette campagne, nous avons enrichi nos connaissances sur les paramètres colorimétriques propres aux LED, comme les coordonnées chromatiques, la température de couleur proximale et les indices de rendu des couleurs.

Quelles sont les étapes à venir ?

Nous avons fait appel à un panel de volontaires pour mettre en œuvre des mesures visuelles sur des échantillons de couleurs, dans différentes conditions d'éclairage. Cette étude est actuellement en cours de réalisation. Les résultats obtenus seront ensuite croisés avec les paramètres colorimétriques que nous avons déjà mis en évidence, afin de formaliser le nouvel indicateur de rendu des couleurs. ■



UNE PARTIE DE L'ÉQUIPE PROJET LED.

De g. à dr. : Bernard Rougïé, Gaël Obein, Annick Razet et Nicolas Pousset.

AUTRES PROJETS

4

E

Un contrôle rapproché des fuites de gaz frigorigènes

Confinant des gaz à effet de serre, les équipements frigorigères doivent désormais faire l'objet de contrôles d'étanchéité périodiques à l'aide d'un détecteur de fuites d'une sensibilité inférieure à 5 g/an, mesurée suivant la norme EN 14624. Pour répondre à cette évolution, le LNE a développé une méthode de mesure de débit de fuites fondée sur l'absorption infrarouge. Celle-ci a permis de concevoir, réaliser et qualifier une chaîne complète d'étalonnage allant de la mesure des débits de fuites calibrées de R-134a (1 g/an à 50 g/an) à l'estimation du seuil de sensibilité des détecteurs manuels suivant cette norme.

Des références à l'échelle nanométrique

La métrologie à l'échelle nanométrique fait appel à de multiples grandeurs et à des domaines de compétences variés. Le LNE a choisi de privilégier trois axes de développement : les mesures granulométriques de nanoparticules aérosols ; les mesures magnétiques à petite échelle et les mesures dimensionnelles d'objets structurés. Ces travaux permettront aux industriels de raccorder leurs instrumentations au SI. Ainsi, les processus dans les industries de l'électronique ou de la cosmétique bénéficieront d'un meilleur raccordement de leurs mesures, améliorant de fait la maîtrise de leurs procédés de fabrication. Les effets des nanoparticules sur la santé pourront également être mieux appréciés.

Un pas de plus vers la maîtrise des radionucléides

Au cours des dernières années, les possibilités de la médecine nucléaire se sont considérablement élargies. Cependant, pour l'industrie radiopharmaceutique, le recours à de nouveaux radionucléides suppose de les caractériser précisément. Le LNE-LNHB a donc lancé une étude sur une sélection de radionucléides jugés prioritaires en vue d'établir des références primaires en termes d'activité et des méthodes de transfert vers les utilisateurs, et de mesurer les données permettant de mieux connaître le schéma de désintégration des radionucléides concernés. Parallèlement, le LNE-LNHB contribue à la mise en place d'une traçabilité internationale.

Des micro-nanosystèmes pour l'industrie et la recherche

De nouvelles technologies innovantes, fondées sur des systèmes électromécaniques à l'échelle micro- et nanométrique à base de silicium – appelés « MEMS », révolutionnent l'industrie dans tous les domaines, aussi bien celui du médical, de l'automobile que celui des télécommunications. En métrologie, les MEMS permettront de réaliser des références de tension électrique dans le domaine alternatif jusqu'à 100 MHz, avec pour applications privilégiées de nouvelles instrumentations miniaturisées aux précisions accrues, comme de nouveaux microgénérateurs de tension.

PERSPECTIVES

La recherche en nanométrie pourra à terme trouver des applications dans trois domaines majeurs. Du côté de l'industrie électronique, une grande exactitude des mesures « on-line » à l'échelle nanométrique est essentielle pour maîtriser la reproductibilité des procédés de fabrication de dispositifs électroniques dont les dimensions sont de plus en plus réduites. Un raccordement de ces instruments, qu'ils soient de type microscopie à champ proche ou diffraction X, est indispensable. Dans la R&D, afin de permettre l'étude des propriétés de matériaux de petites dimensions, de nouvelles instrumentations doivent être développées, au moyen, notamment, d'étaçons adéquats. De nouveaux matériaux de référence doivent donc être mis au point. C'est en particulier le cas en spintronique, où les retournements de spin sont utilisés pour augmenter la capacité de stockage et où des matériaux magnétiques de référence seraient utiles à l'amélioration des dispositifs existants. Enfin, dans le domaine écologique, la détection de matériaux contenus dans des matrices gazeuse ou liquide nécessite également une exactitude qui avoisine le nanomètre.

AU CŒUR DE LA SANTÉ

ALLIÉ AUX POLITIQUES LES PLUS VOLONTARISTES EN MATIÈRE DE SANTÉ PUBLIQUE, LE PROGRÈS MÉDICAL N'EST VALABLE QUE S'IL EST SOUTENU PAR UNE INSTRUMENTATION FIABLE ET INDUSTRIALISABLE. AU CŒUR DE CET ENJEU, L'EXACTITUDE DEVIENT LE SOCLE DE MULTIPLES AVANCÉES FAVORISANT DES TECHNOLOGIES MÉDICALES DE MOINS EN MOINS RISQUÉES POUR LES PATIENTS ET UNE PRÉVENTION RENFORCÉE.

LA RADIOTHÉRAPIE, PLUS POINTUE POUR PLUS DE SÉRÉNITÉ

La radiothérapie est aujourd'hui fondée sur des systèmes complexes. Pour mieux maîtriser ces derniers au plan métrologique, deux projets européens ont été lancés, EBCT et 3D Brachytherapy. Le LNE-LNHB y contribue fortement. Entretien avec son directeur, François Damoy.

LE PROJET EN BREF

Date de création : avril 2008 pour le projet EBCT (External Beam Cancer Therapy) et juillet 2008 pour le projet 3D Brachytherapy.

Laboratoires impliqués : plus d'une dizaine d'instituts nationaux de métrologie européens

Discipline concernée : physique des rayonnements

Calendrier : fin des projets en 2011, mise en œuvre de l'ensemble de la plate-forme Doseo d'ici à fin 2011

Quels sont les enjeux associés aux projets EBCT et 3D Brachytherapy ?

Beaucoup d'améliorations thérapeutiques ont été introduites dans la lutte contre le cancer, comme la radiothérapie conformationnelle à modulation d'intensité, des installations de tomothérapie ou encore le Cyberknife. Ces innovations accroissent les chances de survie des malades en irradiant au plus juste la tumeur et en limitant l'exposition des tissus sains environnants. Mais, du fait de leur complexité, elles tendent à déconnecter les références métrologiques de dose absorbée et les doses effectivement délivrées. Pour garantir la qualité du service de santé, il est indispensable de définir des conditions de référence plus proches des conditions d'utilisation.

Quel bilan peut-on dresser des travaux accomplis à ce jour ?

S'agissant de la radiothérapie externe, les différents programmes engagés ont démontré que les références actuelles – qui sont établies sur la base de champs de rayonnement mesurant 10 x 10 cm² – sont valides jusqu'à 4 x 4 cm². Les investigations se poursuivent sur des champs de dimensions inférieures, mais la limite basse pour réaliser des mesures primaires devrait se situer autour de 2 x 2 cm². Pour la curiethérapie – qui consiste à introduire une source radioactive dans le corps du patient –, l'écart entre les conditions d'utilisation et les conditions de référence ne pourra être comblé

que par la mise en œuvre de dosimètres dotés de performances supérieures en termes de stabilité et de reproductibilité.

Quelles sont les perspectives ?

De nouveaux détecteurs absolus sont actuellement en cours de réalisation pour permettre une mesure primaire sur des champs d'environ 2 x 2 cm². Mais nous entrevoyons déjà la possibilité d'utiliser des dosimètres relatifs millimétriques ; ceux-ci permettront d'accompagner des irradiations adaptées au volume des tumeurs avec une précision de l'ordre du demi-centimètre. Ils rendront possible, également, la cartographie des doses distribuées en 2D, voire en 3D. Plus généralement, les travaux du LNE-LNHB vont désormais s'inscrire dans un projet plus large, appelé « Doseo » et visant à rapprocher les différents acteurs concernés pour développer et maîtriser les systèmes de radiothérapie du futur. ■



UNE PARTIE DES ÉQUIPES PROJETS EBCT ET 3D BRACHYTHERAPY.

De g. à dr. : Jean-Marc Bordy, Dominique Cutarella, Johan Plagnard et Isabelle Aubineau-Lanièce.

AUTRES PROJETS

4

β

MÉTROLOGIE FRANÇAISE

Mieux quantifier les légionelles

Grâce à la méthode de réaction de polymérisation en chaîne (PCR), la biologie moléculaire permet de détecter et de quantifier l'ADN des légionelles. Afin d'étalonner ce type d'analyse, la communauté scientifique française a décidé de se doter d'un étalon primaire d'ADN génomique. Les travaux du LNE ont pour but de caractériser la quantité d'ADN contenue dans cet étalon, en développant une méthode de dosage par ICP-MS fondée sur la quantification du phosphore. Cette démarche doit aussi conduire à définir les incertitudes de la méthode utilisée et à raccorder l'étalon au système international d'unités.

Un diagnostic plus fiable de l'insuffisance rénale chronique

En France, on estime que deux à trois millions de patients sont atteints d'insuffisance rénale chronique. Le diagnostic de la maladie repose sur le dosage d'un marqueur biologique appelé « créatinine ». Pour garantir un dépistage rapide et limiter les dépenses de santé publique, il est nécessaire de pouvoir s'appuyer sur des résultats fiables. Pour répondre à cette préoccupation, le LNE développe actuellement une méthode de référence reposant sur la dilution isotopique associée à la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. Celle-ci permettra d'évaluer la qualité des analyses de routine pratiquées par les laboratoires de biologie médicale.

Analyser le souffle et ses biomarqueurs

Si l'analyse physico-chimique de l'haleine est susceptible de contribuer efficacement au diagnostic précoce de certaines pathologies (cancers, affections broncho-pulmonaires et gastriques), cette capacité reste le plus souvent virtuelle en raison de l'absence d'instrumentation performante et facile d'utilisation. Le projet du LNE-INM, au sein d'un consortium européen, a pour but de rechercher les moyens adéquats en utilisant une technique de détection optique fondée sur la spectroscopie d'absorption laser des composés moléculaires du souffle. Cette technique offre des avantages considérables, notamment en termes de sensibilité de détection (en dessous du ppb, sensibilité d'une truffe canine) et de rapidité de mise en œuvre (diagnostic en temps réel).

Sonder les propriétés structurales des molécules

Après avoir développé une technique interférométrique pour caractériser des composants macroscopiques utilisés dans les télécommunications optiques, le LNE l'étend à des composants microscopiques pour la santé et l'environnement. Les scientifiques s'emploient à réaliser parallèlement des capteurs photoniques (micro-résonateurs opto-fluidiques fonctionnalisés) et leur technique d'interrogation interférométrique. Ils espèrent ainsi aboutir à un dispositif capable d'analyser les molécules chimiques (métaux lourds présents dans l'eau) ou biologiques (ADN) à des échelles inexplorées et observer leur changement de conformation.

PERSPECTIVES

Dans le domaine médical et sanitaire, accroître notre connaissance des dosages et des mécanismes d'interaction entre l'instrumentation et la matière permettra d'affiner encore les diagnostics et les analyses biologiques et médicales. C'est là l'enjeu majeur des recherches menées par le réseau de la métrologie française. Par la réalisation et la conception de nouvelles méthodes, celui-ci contribuera efficacement au développement de nouvelles thérapies, comme les thérapies géniques et l'hadronthérapie (radiothérapie utilisant des protons), mais aussi à la détection précoce de pathologies et, par conséquent, à la prévention des risques. Même s'il est difficile, aujourd'hui, d'en quantifier les bénéfices sur la santé publique, il est vraisemblable que l'amélioration des mesures a un impact direct sur l'être humain, par sa contribution à une réelle prévention et à des soins et des médicaments plus adaptés. Son impact économique est tout autant indubitable – un traitement insuffisant, inadapté ou inutile représentant des coûts non négligeables.

AU CŒUR DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

FACE À UNE ATTENTE FORTE DE LA PART DES GESTIONNAIRES PUBLICS, DES INDUSTRIELS ET DES CITOYENS, DIVERS PROJETS ONT ÉTÉ ENGAGÉS POUR RENFORCER LE CADRE MÉTROLOGIQUE DES ANALYSES ENVIRONNEMENTALES, ET AINSI AMÉLIORER LA QUALITÉ DE LA SURVEILLANCE. OBJECTIF GÉNÉRAL : FAVORISER LA COMPARABILITÉ ET LA TRAÇABILITÉ DES MESURES.

AQUAREF, UN PILIER DE LA SURVEILLANCE DE L'EAU

Pour répondre aux nouveaux besoins sociétaux, les acteurs de la métrologie s'efforcent d'établir de nouvelles références dans le domaine de la chimie. Entretien avec Sophie Vasin-Reimann, responsable du pôle Métrologie chimie et biologie au LNE.

La métrologie chimique est une discipline relativement nouvelle. Comment s'organise le travail visant à faire reconnaître ses apports ?

En effet, le comité du CIPM qui traite spécifiquement de la métrologie chimique – le Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM) – n'a été créé qu'en 1993. Mais, depuis, l'intérêt croissant pour la préservation de l'environnement et pour la protection des consommateurs a donné une importance nouvelle aux problématiques concernant la qualité de l'eau et de l'air. Ce contexte, qui s'est notamment traduit par un renforcement de l'arsenal réglementaire, est bien évidemment favorable au développement de la métrologie chimique. L'enjeu essentiel est aujourd'hui de valider et de mettre à la disposition des laboratoires d'analyse des méthodes et des matériaux de référence garantissant la fiabilité, la comparabilité et la reproductibilité des mesures.

Dans ce contexte, quelle est la vocation d'Aquaref, dont le LNE est partie prenante ?

En 2000, une directive européenne a été votée afin d'établir le cadre d'une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Ce texte exige notamment, de la part des États membres, de parvenir à un bon état écologique et chimique des eaux avant 2015. Aquaref est le laboratoire français de référence pour la surveillance des milieux aquatiques. Créé en 2007, il met en réseau les compétences et les capacités de recherche

de différents établissements dans le domaine de la chimie et de l'hydrobiologie. L'objectif est d'aider les pouvoirs publics à appliquer la directive à travers le développement de méthodes pour identifier les substances concernées (par exemple les sédiments, biotes, boues...), la mise au point d'une méthodologie de la bio-indication, l'élaboration de prescriptions techniques relatives aux opérations de surveillance, la veille scientifique et technique, etc.

Quel bilan peut-on tirer de l'activité initiée depuis 2007 ?

Aquaref a été intégré dans le Schéma national des données sur l'eau (SNDE) pour aider les pouvoirs publics à élaborer les référentiels de codification de ces données. Par ailleurs, le dialogue est désormais bien engagé avec les acteurs de la surveillance des milieux aquatiques grâce à la mise en ligne d'un site web dédié et à l'organisation de séminaires thématiques semestriels. Les perspectives sont désormais multiples : fiabiliser les mesures va nécessiter de nombreuses actions, d'autant plus que de nouveaux risques émergent. ■



UNE PARTIE DE L'ÉQUIPE PROJET AQUAREF.

De g. à dr. : Julie Cabillic, Sophie Lardy-Fontan et Véronique Le Diouren.

LE PROJET EN BREF

Date de création : 2007

Laboratoires impliqués : BRGM, Cemagref, Ifremer, Ineris, LNE

Disciplines concernées : chimie, hydrobiologie

Calendrier : révision du plan national de surveillance de l'eau, de la liste des substances prioritaires et de la déclaration d'état des lieux avant 2015

AUTRES PROJETS

4

π

Champs électromagnétiques : des seuils réellement respectés

Pour garantir le respect des normes en matière d'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques, il importe d'établir la traçabilité des mesures de débit d'absorption spécifique (DAS) aux étalons nationaux, jusqu'à 10 GHz. C'est l'objet d'un projet de recherche européen auquel le LNE est associé. L'objectif est, notamment, de mettre au point des bancs permettant d'étalonner les sondes destinées à la mesure du DAS, ainsi que des bancs associés mesurant la permittivité complexe de liquides de référence et de liquides de DAS équivalents-tissus.

Des méthodes de référence pour déterminer les pesticides

Afin de contrôler les matrices environnementales (eaux, sédiments) et agroalimentaires (céréales et produits dérivés), le LNE développe la méthode primaire d'analyse de pesticides par dilution isotopique. Il associe à cette dernière la chromatographie en phase liquide et la spectrométrie de masse en tandem. Une thèse menée sur cette thématique a déjà permis de valider une méthode analytique pour la détermination de 38 pesticides appartenant à 26 familles chimiques. Grâce à une collaboration universitaire, le LNE propose également un matériau de référence certifié pour la détermination des herbicides dans les eaux.

Garantir la qualité de l'air intérieur

La qualité de l'air intérieur est évaluée au moyen d'échantillonneurs, qui sont analysés en laboratoire. Afin de garantir la justesse des résultats d'analyse, le LNE cherche actuellement à mettre au point de nouveaux matériaux de référence à matrice. Ceux-ci doivent être le plus proches possible des échantillons réels et se présenter sous la même forme que les échantillonneurs utilisés lors des prélèvements sur site. La méthode employée consiste à doper les différents composés d'intérêt (composés organiques volatils, aldéhydes, dioxyde d'azote...) sur des échantillonneurs spécifiques.

Accompagner l'encadrement du nucléaire

Pour mesurer l'état radiologique de l'environnement et l'impact sur ce dernier des installations nucléaires, les laboratoires doivent au préalable obtenir l'agrément de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), délivré à l'issue de tests obligatoires. En tant que laboratoire national de métrologie dans le domaine des rayonnements ionisants, le LNE-LNHB travaille, en collaboration avec l'IRSN, à l'établissement d'un programme de tests interlaboratoires préparatoires aux examens réglementaires. Dans cette perspective, il se consacre notamment à la préparation d'échantillons environnementaux pour différents types de matrices (sols, végétaux, liquides...).

PERSPECTIVES

Plusieurs axes de recherche sont au programme de la métrologie pour la période à venir. L'effort devra porter sur le développement de méthodes analytiques plus performantes – notamment pour pouvoir identifier les polluants émergents –, mais aussi plus faciles et rapides à mettre en œuvre. Les outils de contrôle de qualité – étalons, matériaux de référence – devront également être améliorés.

Au-delà de la surveillance de la qualité environnementale, la métrologie aura un rôle à jouer dans le traitement des milieux (dépollution de l'eau, de l'air...), dans la mesure où l'efficacité de ce type d'opération ne peut être démontrée que sur la base de données d'analyses fiables.

Autre mission fondamentale : l'aide à la fiabilisation des scénarios concernant l'impact du changement climatique sur l'environnement. L'enjeu dans ce domaine est de produire de nouvelles données et d'établir leur qualité afin d'alimenter les modèles numériques utilisés par les prévisionnistes.

Métrologie française

Laboratoire national de métrologie et d'essais
Direction de la recherche scientifique et technologique (DRST)
1, rue Gaston Boissier
75724 Paris cedex 15
Tél. : +33 1 40 43 37 00
E-mail : research@lne.fr
www.metrologie-francaise.fr

