

# STRATÉGIE NATIONALE QUANTIQUE : LE LNE RÉSOUMENT À LA MANOEUVRE AVEC BACQ

**PIÈCE MAÎTRESSE DE LA STRATÉGIE NATIONALE QUANTIQUE, LE LNE PILOTE LE PROGRAMME METRIQS-FRANCE D'ÉVALUATION DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES. IL EST ENTRÉ CETTE ANNÉE EN PHASE OPÉRATIONNELLE AVEC LE LANCEMENT DU PROJET BACQ QUI VISE À ÉTABLIR DES RÉFÉRENCES POUR ÉVALUER LES PERFORMANCES DE CALCULATEURS QUANTIQUES.**



RÉUNION DE LANCEMENT DU PROJET BACQ  
LE 13 SEPTEMBRE 2023.

Tout le consortium était présent, ainsi que le comité consultatif et stratégique du projet, plusieurs fournisseurs de technologies, nos partenaires pour la normalisation, et nos collaborateurs européens, se remémorant Félicien Schopfer, au LNE, en évoquant le séminaire de démarrage officiel du projet BACQ, le 13 septembre dernier. La journée a été très riche, très marquante et a véritablement contribué à souder le consortium. »

BACQ ? Ce projet, auquel participent Thales, Eviden, le CEA, le CNRS, Teratec et le LNE, vise à établir des références – ou benchmarks – pour évaluer les performances de calculateurs quantiques sous l'angle des applications concrètes, c'est-à-dire qui fassent sens pour les utilisateurs finaux. Premier projet financé dans le cadre du programme MetriQs-France, coordonné par le LNE, son lancement signe le début de la phase opérationnelle de l'implication du laboratoire dans la mise en œuvre de la Stratégie nationale quantique.

Dotée d'un milliard d'euros d'investissement public, cette dernière a pour

ambition de placer la France en tête de la compétition internationale dans l'utilisation des technologies quantiques. Dans ce cadre, MetriQs-France est un élément clé : «son objectif est de mettre en place des référentiels de mesure pour l'évaluation de ces technologies émergentes, ce qui est une étape importante pour leur industrialisation future», explique Félicien Schopfer, responsable de MetriQs-France.

Ainsi, concrètement, BACQ a pour mission de fournir des indicateurs opérationnels de haut niveau permettant de noter les performances des ordinateurs quantiques. Ces indicateurs seront fondés sur l'agrégation de métriques techniques, à la fois sur les plans calculatoire et énergétique, relatives à la résolution de problèmes concrets couvrant de nombreux domaines d'application : optimisation, résolution de systèmes linéaires, simulation de physique et factorisation. BACQ fournira *in fine* les codes informatiques pour les tests de référence à implémenter sur différents types de calculateurs quantiques, la liste des métriques à mesurer,

et le modèle de notation à partir de ces métriques.

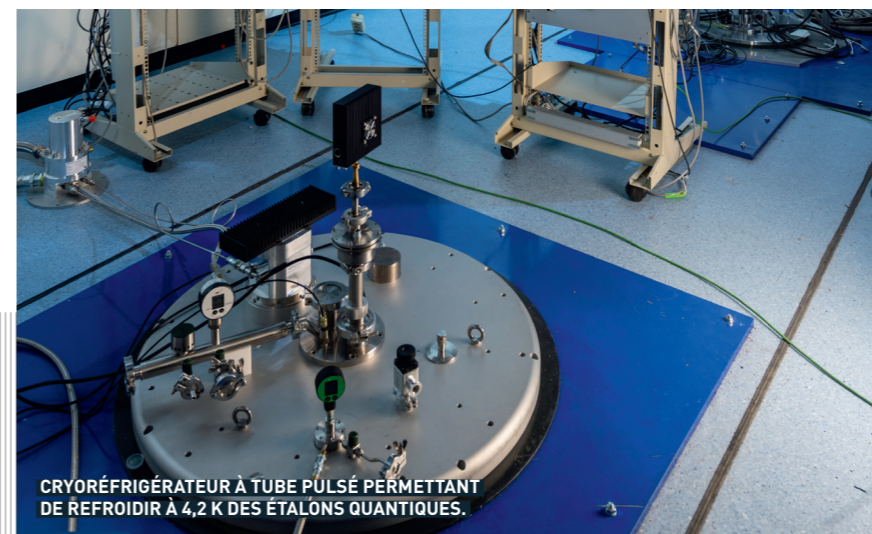
Si le projet a officiellement démarré en septembre dernier, les chercheurs ont débuté leurs investigations dès février 2023 avec un travail sur le benchmark Q-score. Proposé par Eviden, il permet de mesurer les performances de processeurs quantiques pour la résolution du problème d'optimisation Max-Cut, similaire au célèbre problème du «voyageur de commerce». «Q-score sera une des composantes du jeu de benchmarks que nous visons, détaille le physicien. En l'occurrence, il s'agissait d'étendre son utilisation, d'abord pensée pour des calculateurs à portes, à d'autres machines quantiques.» Qubits photoniques de la start-up Quandela, processeurs à atomes neutres de Pasqal, qubits supraconducteurs de la consœur finlandaise IQM ou encore ions piégés du britanno-américain Quantinuum, les partenaires du projet ont ainsi pu avoir accès à plusieurs émulateurs ou processeurs quantiques. Le scientifique ajoute : «pendant trois ans, l'enjeu est de développer des benchmarks pour chacun des problèmes sélectionnés, puis de définir le modèle agrégé multicritère à partir duquel il sera possible de comparer entre eux différents types de processeurs quantiques et de mettre en évidence les atouts de chacune des technos pour une application donnée.» Signe tangible que BACQ est désormais avancé, un premier article de fond détaillant les premiers résultats est prêt pour publication. «C'est une première étape importante qui va permettre de montrer l'assise scientifique du projet», commente Félicien Schopfer.

Au-delà, le projet s'est déjà bien inséré



dans l'écosystème mondial engagé dans la course aux technologies quantiques. Le Séminaire TQCI (*Teratec Quantum Computing Initiative*), organisé le 11 mai dernier à Palaiseau par Teratec, Thales et le LNE y a largement participé. Réunissant l'ensemble des acteurs mondiaux du domaine : spécialistes de benchmarks, fournisseurs de technologies et industriels utilisateurs, pilotes de programmes quantiques, il s'agissait d'échanger autour des différentes initiatives de benchmarking applicatif des calculateurs quantiques. Précisément, le matin a vu la présentation de l'initiative française en la matière, avant les discussions et échanges autour de la présentation des stratégies européennes et internationales. «Cet événement nous a permis de nous rendre visibles, observe le responsable. Nous avons défini la scène et montré que nous étions des acteurs incontournables.» Avec notamment à la clé une prise de contact avec des collègues allemands et hollandais, probable prélude à des collaborations bilatérales ou trilatérales qui se muent peut-être à terme en programmes européens conjoints. Car telle est l'ambition affichée des partenaires de BACQ et au-delà de MetriQs-France : parvenir à un consensus et faire adopter à grande échelle les outils de mesure en cours d'élaboration, seule

façon de garantir à terme la pénétration la plus large possible des technologies quantiques auprès de leurs utilisateurs potentiels. Dans ce but, à noter également, sous l'impulsion de MetriQs-France et avec le soutien de l'AFNOR, la participation française consécutive au sein du tout nouveau Comité technique de normalisation sur les technologies quantiques, lancé en 2023, sous l'égide des organismes de normalisation européens CEN et CENELEC. «Nous y pilotons un groupe de travail sur le calcul et la simulation quantiques, ainsi qu'un projet sur les benchmarks applicatifs directement lié à BACQ, et un autre sur l'hybridation entre le calcul quantique et le calcul haute performance. Nous participons également au groupe de travail sur les capteurs, la métrologie quantique et les technologies habilitantes, détaille le spécialiste qui ajoute : On est en plein virage. Plusieurs décennies de développement de nos étalons quantiques ont donné au LNE une légitimité et une crédibilité qui nous permet maintenant de mettre notre savoir-faire en matière de métrologie, d'essai de certification, d'accompagnement à la normalisation et à la réglementation au service de l'essor des technologies quantiques. C'est cohérent !» À l'image des forces en présence au sein de BACQ, qui toutes travaillent désormais de concert.



CRYORÉFRIGÉRATEUR À TUBE PULSÉ PERMETTANT DE REFOIDIR À 4,2 K DES ÉTALONS QUANTIQUES.

## METRIQS-HUB-FRANCE : UNE PLATEFORME DE MÉTROLOGIE QUANTIQUE AU SEIN DU RNMF

MetriQs-France coordonne le déploiement de cette plateforme au sein du RNMF. À disposition des utilisateurs du secteur public ou industriel, elle proposera à terme des moyens de caractérisation de qubits à l'état solide et de leurs technologies habilitantes (électronique quantique) au LNE, mais également des références de thermométrie à très basse température et de photonique au LNE-Cnam, ainsi que d'évaluation d'horloges atomiques et de gravimètres atomiques au LNE-SYRTE (manipulation d'atomes froids et lasers ultra-stables). Au-delà, ce déploiement verra la mise en réseau d'autres plateformes de caractérisation qui se partageront les bonnes pratiques établies dans le cadre du programme MetriQs-France. Par ailleurs, lancé l'année dernière sous l'égide de l'initiative européenne Quantum Flagship du programme Horizon Europe, le projet Qu-Test ambitionne de déployer une infrastructure d'expérimentation des technologies quantiques à l'échelle du continent. Aux côtés de 12 autres partenaires, laboratoires nationaux de métrologie et organismes de recherche technologique, le RNMF y participe pour la partie temps-fréquence et gravimétrie (LNE-SYRTE), pour la caractérisation des qubits (LNE) et pour les technologies habilitantes. La validation de ces services impliquera la mise en œuvre de cas d'usage proposés par des entreprises partenaires. Pour le cas d'usage qui concerne le LNE, il s'agit de CryoConcept et de la start-up Alice & Bob, acteurs clés de la Stratégie nationale quantique.

# LE KELVIN QUANTIQUE : NOUVEAUX ÉTALONS ET THERMOMÈTRES EN LIGNE DE MIRE

**DES CAPTEURS OPTOMÉCANIQUES MICROSCOPIQUES PERMETTENT DES MESURES ABSOLUES DE TEMPÉRATURE. SEUL LABORATOIRE NATIONAL DE MÉTROLOGIE EUROPÉEN À EN MAÎTRISER L'USAGE, LE LNE-CNAM ENTEND FAIRE DE CES DISPOSITIFS UN OUTIL AU SERVICE DE L'ESSOR DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES.**

En 2018, l'unité de température, le kelvin, de même que trois autres unités du Système international d'unités (SI), a vu sa définition modifiée. Précédemment, le kelvin était défini comme une fraction de la température du point triple de l'eau, c'est-à-dire en référence à un étalon matériel. Désormais, le kelvin est fondé sur la définition thermodynamique de la température, soit en rapport avec l'agitation thermique des atomes du corps, indépendante de la nature chimique de ses constituants, laquelle est reliée à la température de ce corps par la constante de Boltzmann dont la valeur numérique est désormais fixée par le SI.

Afin de mettre en pratique cette nouvelle définition entrée en vigueur en mai 2019 et d'assurer la traçabilité métrologique de tous les types de mesure, le laboratoire de thermométrie du LNE-Cnam travaille activement à la mise en cohérence des échelles de température toujours utilisées dans la pratique courante et au développement de nouveaux moyens de mesure absolue.

Pour mesurer les températures cryogéniques, le laboratoire s'est ainsi fait une spécialité des techniques quantiques. Adaptées aux mesures à l'échelle du micromètre, elles accompagneront l'essor des technologies quantiques tout en offrant la possibilité de disposer de thermomètres auto-étalonnés.

## UN THERMOMÈTRE À CRISTAL PHOTO-PHONONIQUE

Plusieurs solutions s'offrent aux métrologues pour mesurer la température telle que nouvellement définie. Et le LNE-Cnam en développe plusieurs, adaptées à différentes applications et gammes de température. L'une d'elles consiste à

utiliser un cristal photo-phononique pour concevoir un thermomètre. Cette structure nano-fabriquée est caractérisée par une variation périodique de ses propriétés optiques et élastiques, formant à la fois un résonateur mécanique et une cavité optique, couplés par interaction optomécanique. Ainsi, grâce à ce couplage entre les modes optiques et mécaniques, il est possible de mesurer le mouvement mécanique du résonateur (dû aux fluctuations thermiques) par un moyen optique (laser). «*En principe, un tel thermomètre peut être facilement intégré à un composant microscopique tel une puce électronique ou optique, ou encore un qubit quantique dont on souhaiterait connaître la température, commente Olga Kozlova, chercheuse en thermométrie au LNE-Cnam. Par ailleurs, d'une grande souplesse, il offre la possibilité de mesurer la température thermodynamique de différentes manières, chacune ayant sa pertinence selon la température considérée.*

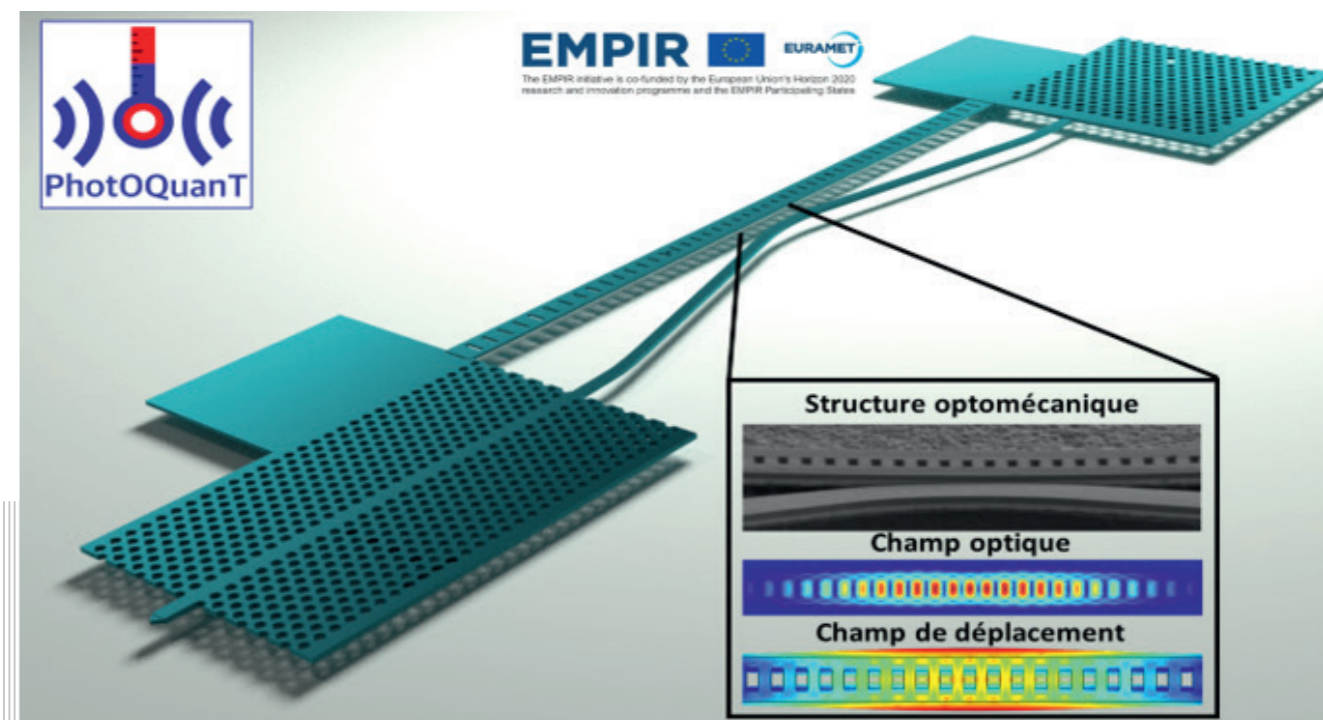
Au laboratoire de thermométrie, l'intérêt pour ces capteurs optomécaniques a débuté dès 2017, dans le cadre du projet européen PhotOQuanT du programme EURAMET-EMPIR, proposé et piloté par Stéphane Briau, physicien et professeur au Cnam. Au sein de ce projet, le partenariat français constitué entre le LNE-Cnam, le Laboratoire Kastler-Brossel (LKB) et le Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N) est parti de zéro : simulation, nano-fabrication d'un cristal photo-phononique, dispositif expérimental, instruments de mesure...

Grâce à ce premier projet, finalisé en 2021, les métrologues ont mis au point deux protocoles de mesure de la température. Le premier, photonique, est fondé sur la modification de la fréquence de

résonance optique du cristal optomécanique induite par sa dilatation thermique et la variation de son indice de réfraction sous l'effet d'une variation de température. La seconde technique, de thermométrie à bruit, consiste à mesurer le bruit mécanique de l'agitation thermique du résonateur, proportionnelle à sa température thermodynamique, par la mesure des fluctuations de phase du laser sonde. «*La première technique est relativement facile à mettre en œuvre, observe l'expérimentatrice. La dépendance en température de la fréquence optique de résonance est linéaire entre 100 K et 300 K. Mais en dessous de 100 à 50 K, la sensibilité de la fréquence à la température chute et limite le domaine d'utilisation de cette technique. La seconde technique est adaptée sur toute la gamme entre 10 K et 300 K, mais requiert un dispositif expérimental plus élaboré pour détecter optiquement le bruit mécanique.*

## LA MESURE ABSOLUE DE TEMPÉRATURE

En revanche, ces deux procédures de mesure de température ne sont pas absolues et nécessitent par conséquent une référence de température, un étalon. C'est là que l'équipe a exploité un autre avantage de ce capteur optomécanique pour accéder à la température thermodynamique de manière absolue. Exploré actuellement par les trois partenaires du projet ANR LaRaQOfT, son principe est complexe. Concrètement, cette technique utilise les corrélations quantiques entre les quadratures de phase et d'amplitude du laser sonde (résultantes du bruit de la pression de radiation) comme une échelle absolue pour mesurer le bruit mécanique du résonateur (proportionnel à sa température). «*On dispose alors en principe*



d'un thermomètre absolu, ne nécessitant aucun raccordement à une référence, expose Olga Kozlova. Cette technique, particulièrement adaptée aux mesures entre 1 K et 30 K, permettrait par ailleurs de valider et de raccorder les autres techniques de mesure, de quoi disposer in fine d'un thermomètre auto-étalonné sur une large gamme de température.» «*C'est un sujet de recherche fondamentale ambitieux et les incertitudes de mesure ne sont pas encore compétitives avec celles des meilleurs capteurs de température*», concède Mohamed Sadli, responsable de l'équipe de thermométrie. «*Mais les progrès sont devant nous ! Si nous parvenons à démontrer l'auto-étalonnage, ce serait une première mondiale*», s'enthousiasme sa collègue métrologue.

Cette prouesse, les métrologues projettent de la réaliser dans le cadre de deux tout nouveaux projets européens de recherche, QUANTIFY du programme Horizon Europe et plus particulièrement PhoQuS-T du programme EPM d'EURAMET, piloté par Olga Kozlova. Ces projets seront également l'occasion de comparer différents dispositifs optomécaniques, différentes méthodes de mesure et même plusieurs degrés d'intégration des composants. De leur côté, les métrologues français demeureront, dans ces projets, les seuls à développer des techniques d'optique quantique pour la mesure absolue de température ther-

modynamique, dont l'une permettra des mesures entre 10 mK et 1 K.

## UNE INFRASTRUCTURE QUANTIQUE UNIQUE EN EUROPE

Pour ce faire, le laboratoire de thermométrie du LNE-Cnam, dans le cadre de

sa participation au réseau francilien DIM (domaine d'intérêt majeur) QuantIP, fera cette année l'acquisition d'un nouveau cryostat adapté aux mesures optiques pour explorer les températures entre 1 K et 30 K, gamme de recouvrement des températures accessibles par les diffé-

## DES ÉTALONS DE TRÈS HAUTE TEMPÉRATURE : POINTS FIXES JUSQU'À 3 000 K

La dissémination du kelvin peut désormais être fondée sur des points fixes (transitions de phases contrôlées et reproductibles) auxquels auront été affectées des valeurs de température thermodynamique, donc indépendantes des valeurs de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90). Aux très hautes températures, ceux-ci sont matérialisés par des alliages métalliques (métal-carbone) à la composition eutectique ou péritectique portés à leur température de fusion.

Dans le cadre du projet européen Real-K, dont la partie «haute température» était coordonnée par le LNE-Cnam, six laboratoires nationaux de métrologie européens ont ainsi déterminé la température de 4 nouveaux points fixes, qui s'ajoutent à 3 autres dont la température thermodynamique avait été mesurée en 2016 (projet européen InK).

Les métrologues français ont notamment mesuré la température de fusion d'un alliage péritectique de carbure de tungstène-carbone, déterminée ensuite collectivement à  $3\,020,85\text{ K} \pm 0,25\text{ K}$  ( $k=2$ ), alors que le point fixe le plus élevé de l'EIT-90, le point de congélation du cuivre, se situe à  $1\,357,77\text{ K}$ . Ainsi, entre 1 300 K et 3 000 K, la température thermodynamique de changement de phase de 7 points fixes est désormais connue avec une incertitude inférieure à 0,5 K. Ces points fixes permettront la réalisation et la dissémination des références SI de température avec des incertitudes et une facilité impossibles à atteindre par la méthode radiométrique directe mise en œuvre actuellement.

rentes techniques de mesure au laboratoire. Comme le résume Mohamed Sadli, « nous ambitionnons d'être, pour la métrologie thermique, les moteurs du réseau européen de métrologie constitué pour favoriser le déploiement des technologies quantiques, et de faire du RNMF une référence pour les mesures quantiques à basse température. »

Très concrètement, le LNE-Cnam va ainsi devenir l'un des points d'ancrage de la plateforme de métrologie quantique du programme national de développement des référentiels de mesure et d'évaluation des technologies quantiques, MetriQs-

France. Coordonné par le LNE dans le cadre de la Stratégie nationale quantique, il verra le déploiement d'une infrastructure de référence, au sein du RNMF. À cet effet, le LNE-Cnam se dotera d'ici une ou deux années d'un réfrigérateur à dilution pour des applications en dessous de 1 K de son futur thermomètre optomécanique. « Muni de sondes quantiques intégrables, il permettra d'effectuer des prestations externes pour mesurer la température de qubits par exemple », ajoute Olga Kozlova. Mohamed Sadli conclut : « À l'horizon 2030, si nous disposons des moyens humains et matériels

nécessaires, nous serons l'un des rares laboratoires de métrologie au monde capable de maîtriser ces techniques et de proposer des étalonnages pour ce type de thermomètres en dessous de 1 K. Une chose est sûre, depuis la nouvelle définition du kelvin, nous avançons avec détermination vers la réalisation et la dissémination de la température thermodynamique ; ce qui a le potentiel de changer le visage de la thermométrie à très basse température mais également pour l'ensemble des températures. »



CONSORTIUM DU PROJET EUROPÉEN JRP PHOTOQUANT PILOTÉ PAR STÉPHAN BRIAUDEAU.

## PRIX LNE DE LA RECHERCHE 2023

### BRUNO HAY RÉCOMPENSÉ POUR SES TRAVAUX EN MÉTROLOGIE DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DES MATÉRIAUX

**Vous êtes directeur de recherche au LNE et responsable du pôle Photonique-Énergétique, et vous avez reçu le prix LNE de la recherche pour vos travaux en métrologie thermique. Quelle est votre spécialité ?**

**B.H. :** Mon activité de recherche consiste à développer des références métrologiques pour la caractérisation des propriétés thermiques des matériaux telles que la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la capacité thermique massique ou encore les propriétés radiatives. Plus généralement, de formation ingénieur, j'ai un goût prononcé pour la recherche orientée vers les applications industrielles. C'est ce qui a influencé mon parcours depuis mon arrivée au LNE en 1992.

**Dans cet esprit, vous êtes notamment à l'origine de la plateforme MATIS ?**

**B.H. :** En effet, au fil des années, le développement de cette plateforme métrologique, qui rassemble de nombreux instruments pour la mesure de propriétés thermophysiques traçable au SI dans une large plage de température, a été guidé par les besoins des laboratoires de recherche publics et des industriels. C'est notamment ce qui explique son caractère intégré assez unique. Plus précisément, MATIS est tournée vers les hautes et ultra-hautes températures eu égard aux contraintes spécifiques exprimées par les industries de la Défense, du secteur spatial, nucléaire ou

encore des transports, très présentes en France.

**Vous avez par ailleurs participé ou dirigé de très nombreux projets ?**

**B.H. :** Environ une quinzaine de projets internationaux. Le dernier, Hi-TRACE, projet du programme EMPIR d'EURAMET dont j'ai été le coordinateur, est l'une de nos plus belles réussites. Finalisé en 2021, il permet désormais des mesures traçables au SI de capacité thermique massique, de diffusivité thermique et d'émissivité spectrale à très haute température. Au LNE, ce projet est à l'origine du développement d'un banc de mesure de la diffusivité thermique jusqu'à 3 000 °C avec une incertitude inférieure à 5 %. Cette installation métrologique polyvalente, qui permet également de mesurer la capacité thermique massique, est unique au monde. Les résultats de Hi-TRACE ont également nourri la révision de la norme ISO 18755 sur la mesure de la diffusivité thermique des céramiques monolithiques. Ils ont par ailleurs fait l'objet d'un article publié dans la revue *International Journal of Thermophysics*, qui a remporté le prix 2023 du *Ared Cezairliyan Best Paper Award* remis lors de l'*European Conference on Thermophysical Properties*. J'ajoute que l'ensemble des collègues qui travaillent au développement de la plateforme MATIS sont co-auteurs de cet article, ce qui donne à ce prix une valeur collective. Cette reconnaissance de nos travaux de recherche par des



pairs internationaux est en effet très fédératrice pour l'équipe.

**Dans quelles directions allez-vous poursuivre vos travaux ?**

**B.H. :** Concernant les mesures de diffusivité thermique à haute température, nous travaillons à la rédaction d'un guide de bonnes pratiques et nous allons bientôt piloter une comparaison interlaboratoire européenne. Nous envisageons également d'étendre nos moyens métrologiques actuels vers des températures plus basses afin notamment de répondre à des demandes du secteur spatial. Pour la petite histoire, nos relations avec Arianespace qui était partenaire du projet européen Hi-TRACE, nous ont permis d'intégrer le consortium d'un projet soutenu par l'Agence spatiale européenne (ESA) pour étudier des matériaux ablatifs pouvant servir

de bouclier thermique. Et par ce biais, nous avons été mis en relation avec une équipe du *Massachusetts Institute of Technology* avec laquelle nous travaillons désormais sur un sujet similaire. Nous étoffons ainsi notre réseau de partenaires qui va bien au-delà des frontières hexagonales, ce dont nous sommes très fiers !

**Que représente pour vous le prix LNE de la recherche ?**

**B.H. :** Ce prix est une belle mise en valeur des travaux de métrologie thermique que je mène avec mes collègues depuis une trentaine d'années sur cette thématique de recherche appliquée. Sur un plan personnel, il symbolise également une reconnaissance de mon activité de management de projet et des compétences d'une équipe pluridisciplinaire qui a permis de mener de front divers projets de R&D au meilleur niveau international.