

MÉTROLOGIE FONDAMENTALE

LA MÉTROLOGIE EST À LA CROISÉE DU DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE, DE L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE ET DE LA RECHERCHE FONDAMENTALE. AINSI LE LNE ET LE RNMF DÉVELOPPENT-ILS DE NOUVEAUX ÉTALONS PRIMAIRES EN S'APPUYANT SUR DES AVANCÉES SCIENTIFIQUES DE POINTE. ILS RECHERCHENT ÉGALEMENT DE NOUVEAUX PRINCIPES DE MESURE POUR DISSÉMINER LES ÉTALONS EN ACCORD AVEC LE SI DE FAÇON À CE QUE TOUT CHANGEMENT S'OPÈRE SANS À-COUPS.

GRAPHITE PYROLYTIQUE : UN ATOUT POUR MESURER LA PUISSANCE D'UN FAISCEAU LASER

LES PROPRIÉTÉS DE LÉVITATION DU GRAPHITE PYROLYTIQUE EN FONT UN MATÉRIAU IDÉAL POUR RÉALISER DES PENDULES DE TORSION DE TRÈS FAIBLE RAIDEUR. LES MÉTROLOGUES DU LNE-CNAM ONT DÉMONTRÉ LA FAISABILITÉ DE LA MESURE DE PUISSANCE OPTIQUE AVEC QU'UN TEL DISPOSITIF.

En radiométrie, la référence nationale pour la mesure de flux énergétique (puissance optique d'un faisceau de lumière) est un radiomètre cryogénique. Fondé sur la comparaison directe de la puissance du rayonnement à une puissance électrique dissipée par effet Joule dans une résistance, il permet d'atteindre une incertitude relative de mesure de l'ordre de 5×10^{-5} . Pour autant, les mesures de puissance se dégradent rapidement (jusqu'à atteindre plus de 1 %) lorsqu'elles sont effectuées avec d'autres instruments de mesure, plus couramment utilisés tels les thermopiles (capteurs thermiques) ou les photodiodes (capteurs optiques). Pour faire face à la demande croissante d'étalonnage de ces instruments, il serait nécessaire de développer de nouvelles méthodes, plus performantes, pour mesurer la puissance optique d'un laser. C'était l'objet d'un projet de métrologie fondamentale mené par l'équipe «Masse et grandeurs apparentées» du LNE-Cnam et dont les résultats ont été présentés l'année dernière. Fondée sur la mesure de la pression de radiation exercée par une impulsion laser sur un système de type «balance de torsion», la nouvelle méthode s'est révélée prometteuse pour la photométrie, mais également pour la mesure de minuscules forces mécaniques.

Le principe du dispositif mis en œuvre repose sur les propriétés particulières du graphite pyrolytique. Composé de couches de graphène, ce matériau développé à partir des années 1960 est formé de feuillets de quelques millimètres d'épaisseur et possède des propriétés magnétiques remarquables. Doté d'un très fort diamagnétisme à température ambiante, il est «facile» d'en placer un feuillet en lévitation au-dessus d'un simple aimant permanent (néodyme fer bore).

Tirant partie de cette propriété, les métrologues ont proposé un montage expérimental pour mesurer la puissance optique d'un faisceau laser. Il consiste à positionner un feuillet de graphite pyrolytique stabilisé au-dessus d'un champ magnétique idéal, le rendant ainsi libre de tourner autour d'un axe vertical. Plus précisément, percé de petits trous à l'origine de légères anisotropies, le feuillet tend à retrouver une position d'équilibre une fois mis en rotation. Il réalise ainsi une balance de torsion de très faible raideur.

Équipée d'un axe horizontal au bout duquel se trouve un miroir, cette balance peut être mise en oscillation sous l'effet de la pression de radiation d'une impulsion laser. La puissance de cette dernière est alors déterminée par la mesure des caractéristiques du mouvement de la balance. «Une modélisation fine de notre système montre que la puissance énergétique de l'impulsion optique s'exprime comme une fonction de l'angle maximal de déplacement du feuillet, des paramètres caractérisant l'amortissement des oscillations et du moment d'inertie du



Trois questions à...

ZACCARIA SILVESTRI, INGÉNIEUR DE RECHERCHE

Comment est né votre intérêt pour le graphite pyrolytique ?

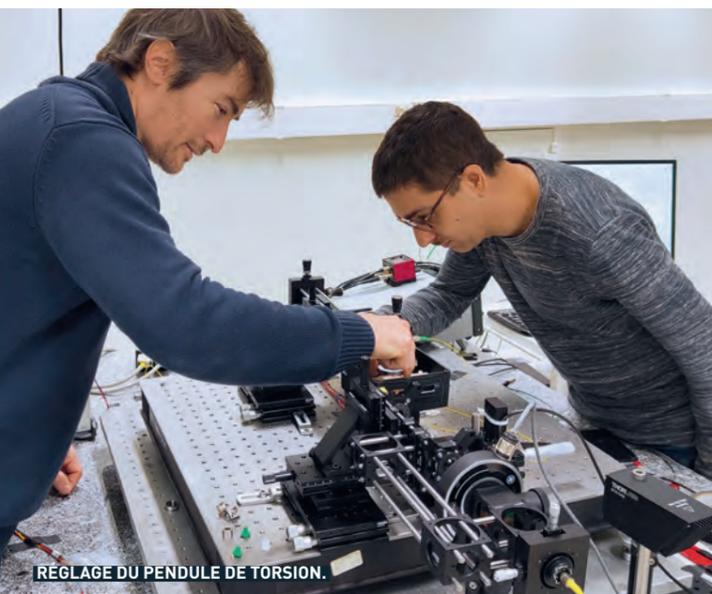
Z.S. : Vers 2017, mon collègue Patrick Pinot, retraité depuis 2019, a réalisé tout le potentiel de ce matériau eu égard à ses propriétés magnétiques extraordinaires. Nous travaillons dans le domaine de la métrologie mécanique et nous avons d'abord pensé à des applications pour des mesures de force ou de masse. Mais des discussions au sein du LNE-Cnam nous ont mis sur la piste des mesures de puissance optique pour initier ce projet auquel a également contribué Alain Vissière.

Quelles applications concrètes imaginez-vous pour votre dispositif ?

Z.S. : S'agissant d'un projet exploratoire, il est un peu tôt pour être catégorique. Mais nos collègues de l'équipe Radiométrie-Photométrie se sont montrés très intéressés par nos résultats. À terme, on peut imaginer que notre méthode vienne enrichir les capacités d'étalonnage du LNE-Cnam pour les mesures de puissance optique. Par ailleurs, avec le renfort de Simon Noviant, nous explorons désormais la possibilité de mesurer une force de très faible intensité grâce à un nouveau dispositif exploitant lui aussi les propriétés exceptionnelles du graphite pyrolytique.

Vous êtes également engagés dans un projet ANR pour des applications en biologie ?

Z.S. : En effet, nous débutons en mars 2024 en collaboration avec l'institut Femto-ST de Besançon, un projet pour étudier comment notre dispositif de mesure de force pourrait permettre d'étalonner les appareils utilisés en biologie médicale pour caractériser des ovocytes à partir de leurs propriétés mécaniques, avant leur implantation dans l'utérus pour une PMA. La médecine et la biologie sont vraisemblablement parmi les domaines où les besoins de mesures raccordées au SI de très faibles valeurs de force sont les plus prégnants.

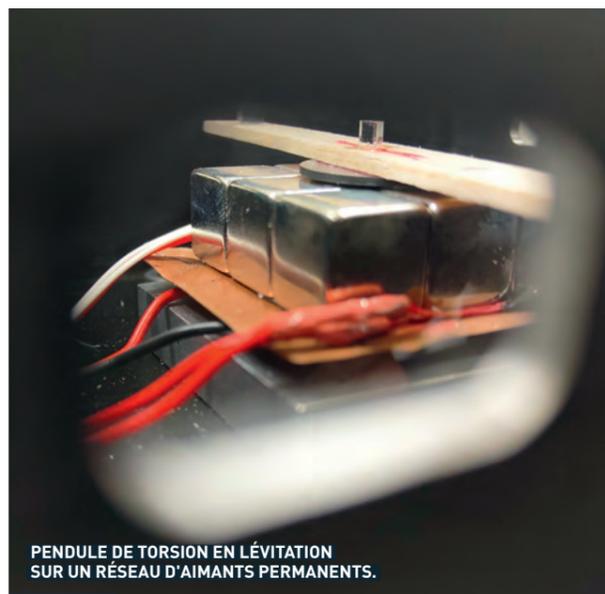


REGLAGE DU PENDULE DE TORSION.

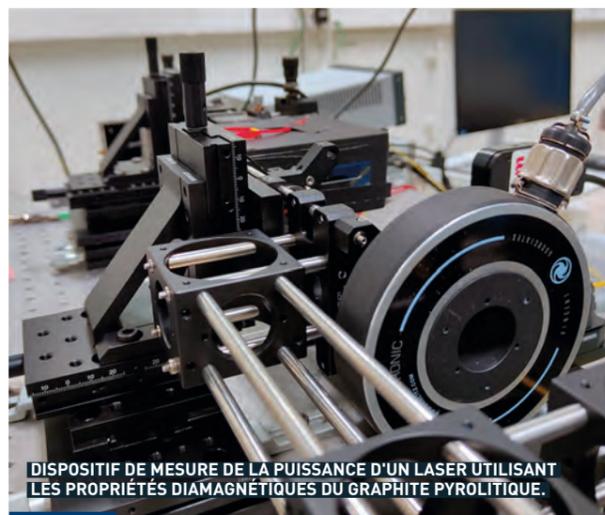
dispositif déterminé au préalable par des mesures raccordées à la masse et aux dimensions géométriques du dispositif», détaille Zaccaria Silvestri, chercheur en métrologie mécanique au LNE-CNAM et responsable du projet. Ainsi, la détermination expérimentale des paramètres associés aux oscillations permet d'accéder directement à la puissance optique du faisceau incident, raccordée ainsi aux unités SI de longueur, de masse et de temps.

Après une démonstration de principe réalisée en 2018, les spécialistes ont amélioré leur expérience. Par un contrôle fin de la dérive thermique due aux impulsions et de l'horizontalité du feuillet de graphite pyrolytique, et la réalisation d'un système optique permettant de s'abstraire de la mesure de la distance entre la photodiode et le miroir servant à la mesure de l'angle de déviation, ils sont ainsi parvenus à réaliser des mesures dont l'incertitude relative est inférieure à 1%. «La principale source d'incertitude est la mesure de l'angle maximal de rotation, affectée par les vibrations résiduelles», indique le chercheur.

Afin de finaliser le bilan d'incertitude, les scientifiques doivent encore comparer leur résultat avec celui d'une mesure sur un laser étalonné et mieux stabilisé que celui utilisé initialement. Pour autant, ils ont montré que leur nouvelle méthode de mesure de la puissance optique est une alternative crédible à celles réalisées avec une thermopile ou une photodiode. Si les applications à la photométrie sont a priori les plus évidentes, les métrologues ont déjà étudié l'année passée une nouvelle configuration de leur expérience où un aimant est pris en sandwich entre deux feuillets de graphite pyrolytique en position verticale. Ils ont ainsi construit un fléau avec lequel il est possible de mesurer, en principe, des forces mécaniques comprises entre 0,1 et 100 nN, alors même qu'il n'existe à l'heure actuelle aucune façon satisfaisante d'étalonner un dynamomètre pour de si faibles forces. Un autre projet, débuté l'année dernière, vise la mise au point d'une telle mesure avec une incertitude cible de l'ordre de 1%.



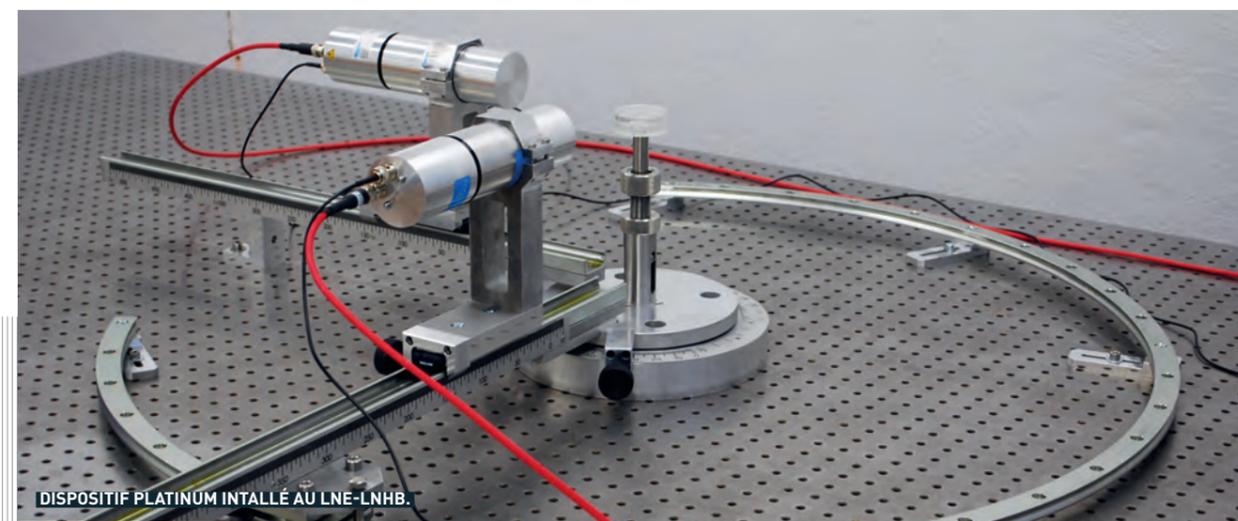
PENDULE DE TORSION EN LÉVITATION SUR UN RÉSEAU D'AIMANTS PERMANENTS.



DISPOSITIF DE MESURE DE LA PUISSANCE D'UN LASER UTILISANT LES PROPRIÉTÉS DIAMAGNÉTIQUES DU GRAPHITE PYROLYTIQUE.

CHIFFRES CLÉS

La balance de torsion fondée sur les propriétés magnétiques du graphite pyrolytique (PyC) mise au point au LNE-CNAM permet la mesure de puissance optique d'impulsions laser avec une incertitude inférieure à 1% et avec une résolution de quelques dizaines de milliwatts pour des puissances entre 100 mW et 5 W. Cette même incertitude est la cible d'autres développements, déjà engagés, exploitant le PyC pour mesurer une force de quelques nanonewtons.



DISPOSITIF PLATINUM INTALLÉ AU LNE-LNHB.

SCHÉMAS DE DÉSINTÉGRATION DES RADIONUCLÉIDES : UNE PLATEFORME POUR LES AFFINER

Les schémas de désintégration de certains radionucléides sont mal connus. Or la détermination métrologique de leur activité en dépend. Pour pallier ce manque, le LNE-LNHB a conçu une nouvelle plateforme modulable, PLATINUM, destinée à couvrir l'ensemble des besoins comme l'utilisation de plusieurs types de capteurs. Précisément, ce banc instrumenté permet de déterminer les corrélations angulaires de l'émission gamma-gamma de sources radioactives. Pour ce faire, «PLATINUM offre la possibilité de faire varier, à un dixième de degré près, l'angle avec lequel deux détecteurs, spectromètres gamma à base de scintillateurs, sont positionnés par rapport à la source», expose Sylvain Leblond, chercheur au laboratoire de métrologie de l'activité du LNE-LNHB. L'électronique numérique de détection associée

permet de détecter simultanément, à 1 ns près, l'arrivée en coïncidence des photons.»

Désormais, grâce à la connaissance des paramètres relatifs aux processus quantiques à l'œuvre au sein du noyau, les métrologues pourront tirer meilleur parti des données de spectroscopie gamma, en ayant moins recours à des calculs théoriques ou semi-empiriques, pour établir plus précisément les schémas de désintégration d'un plus grand nombre de radionucléides. Actuellement les métrologues réalisent des mesures de validation de la plateforme en utilisant une source de cobalt-60 très bien connue. Le développement se poursuit qui permettra de coupler deux types de détecteurs, par exemple photons-électrons, pour des mesures spécifiques et même des mesures primaires d'activité.

ÉTALON QUANTIQUE DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE EN GRAPHÈNE : FIABILITÉ ET FACILITÉ DE MISE EN ŒUVRE

Le graphène est un candidat très prometteur pour la réalisation de l'étalon quantique de résistance et pour la dissémination plus large des références électriques. Le projet de recherche mené dans l'équipe de métrologie électrique fondamentale du LNE, clos en fin d'année dernière, visait à simplifier la mise en œuvre de l'étalon à l'effet Hall quantique avec le graphène, tout en gardant le meilleur niveau d'incertitude.

Lors de projets précédents, les métrologues du LNE avaient démontré le potentiel du graphène pour accéder à l'effet Hall quantique à un champ magnétique plus faible et une température plus élevée par rapport à l'arséniure de gallium (AsGa) utilisé jusqu'à présent.

Fort de cette preuve de concept, ils ont collaboré avec le CNRS pour fiabiliser la technologie de fabrication d'échantillons à base

de graphène. «Notre procédé permet une réalisation de l'effet Hall quantique à un champ magnétique inférieur à 5 T et à une température supérieure à 4 K, contre 10 T et 1,5 K dans des structures à base d'AsGa», se félicite Mathieu Taupin, chercheur de l'équipe projet.

En parallèle, ils ont travaillé à mettre en place un nouveau système cryomagnétique à tubes à gaz pulsés, sans les contraintes d'utilisation d'hélium liquide. «Tout l'enjeu était de montrer que les vibrations engendrées par ce type de système n'entraînaient pas la qualité des mesures», explique son collègue François Couëdo.

Ceci étant fait, les scientifiques visent désormais à étendre les applications des étalons en graphène en développant un étalon quantique d'impédance, tout en poursuivant leur contribution à l'essor des technologies quantiques en général.

APPROBATION DE UTC «CONTINU» POUR L'ÉCHELLE DE TEMPS DE RÉFÉRENCE LORS DE LA CONFÉRENCE MONDIALE DES RADIOCOMMUNICATIONS DE 2023

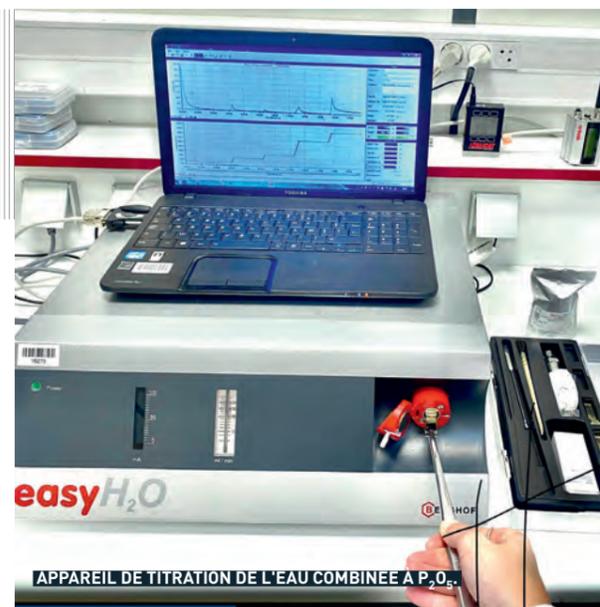
« C'est l'aboutissement de 23 ans de travail », résume Joseph Achkar, chercheur dans l'équipe des Références de temps au LNE-SYRTE. La Conférence mondiale des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT), qui s'est tenue du 20 novembre au 15 décembre dernier à Dubaï, a approuvé l'adoption et la mise en œuvre du Temps universel coordonné (UTC) «continu» comme l'échelle de temps de référence recommandée au niveau international. L'idée de supprimer les secondes dites intercalaires vise à éviter les risques de dysfonctionnement d'infrastructures numériques liés à la compensation de l'écart entre UTC fondé sur le Temps atomique international (TAI) et UT1 calculé à partir de la rotation de la Terre dont l'évolution à long terme est non prédictible. Émise dès l'an 2000, soutenue dès l'origine par le LNE-SYRTE contributeur majoritaire au calcul du TAI, et officiellement portée par plusieurs pays dont la France, la proposition n'a pourtant fait

l'objet d'aucun consensus jusqu'à 2023.

La situation s'est débloquée en 2022 avec l'adoption par la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) de la suppression des secondes intercalaires, pour effet au plus tard en 2035. Restait à l'UIT, qui décide du format de diffusion des signaux horaires, à se mettre en cohérence avec cette Résolution 4 de la 27^e CGPM. C'est désormais chose faite, en particulier grâce à l'important travail réalisé par le Groupe de travail 7A de l'UIT-R, présidé par Joseph Achkar, dont le rapport UIT-R TF.2511 sur l'UTC a permis de faire converger toutes les parties prenantes. La 28^e CGPM, en 2026, pourra adopter la nouvelle tolérance maximale entre UT1 et UTC proposée par la communauté des métrologues ainsi que la date d'application de l'UTC continu. L'année suivante, l'Assemblée des radiocommunications de l'UIT pourra adopter le nouveau format des signaux horaires à diffuser, défini par son Groupe de travail 7A.



CONFÉRENCE MONDIALE DES RADIOCOMMUNICATIONS DE L'UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS (UIT) - DUBAÏ, 20/11-15/12/2023.



MESURE D'HUMIDITÉ DANS LES SOLIDES, DÉSORMAIS TRAÇABLE AU SI

En France, aucun laboratoire ne dispose d'une accréditation COFRAC pour étalonner des instruments de mesure de l'humidité dans les solides. Cette situation entraîne un déficit de traçabilité au SI des mesures industrielles dans ce domaine. Pour y remédier, le LNE-CETIAT, en charge des références d'hygrométrie au sein du RNMF, a mené ces dernières années un important travail pour développer une instrumentation primaire spécifique à cette mesure. Plusieurs méthodes permettent de mesurer l'humidité dans les solides. Les méthodes chimiques consistent le plus souvent en une titration de l'eau par une réaction chimique sélective, de type Karl Fischer, après extraction de l'eau de la matrice solide, par exemple par évaporation par chauffage. L'électrolyse de l'eau combinée à du pentoxyde de phosphore permet aussi d'estimer la quantité d'eau. Une autre méthode consiste à extraire l'eau de l'échantillon solide et à déterminer la quantité extraite par pesée de l'échantillon avant et après extraction, méthode gravimétrique donc. Le LNE-CETIAT s'est alors équipé d'une instrumentation mettant en œuvre ces trois types de mesure de la quantité d'eau. «À l'issue d'une méticuleuse caractérisation métrologique de ces nouveaux bancs, le laboratoire peut désormais réaliser des mesures d'humidité dans des solides, traçables au SI, avec une incertitude de l'ordre de 2 à 4 %», détaille Eric Georgin, responsable du pôle thermodynamique du CETIAT. Cette possibilité ouvre la voie aux étalonnages d'humidimètres et à l'optimisation de procédés industriels, comme le séchage, essentiels pour le stockage de matériaux de construction ou de denrées agricoles.