

La métrologie au service de la garantie

6^e forum Métrologie au CEA – DAM



N° 08 / NOVEMBRE 2023

FOCUS

EN COUVERTURE. Quelques moyens expérimentaux : station infrason de Tahiti pour le contrôle du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (centre DAM Île-de-France), métrologie des sondes fibres optiques en détonique (centre DAM Île-de-France), hall d'expérimentations Hyperion (centre de Gramat) en vignette et chambre d'expériences du Laser Mégajoule (centre du Cesta).

La métrologie au service de la garantie

6^e forum Métrologie au CEA - DAM

Commissariat à l'énergie atomique
et aux énergies alternatives.
Direction des applications militaires.

Directeur de la publication
Olivier Vacus

Coordinateur scientifique
Alain Hervé

Comité scientifique
K. Branchu, B. Crouzet, O. Durand,
A. Hervé, J.-L. Miquel

Rédacteur en chef
Jean-Marc Laborie

Création, réalisation et impression
EFIL / www.efil.fr

Conformité
Régine Regnault

Correction
Stylience / www.stylience.fr

Couverture
© Cadam

Diffusion et abonnement
Régis Vizet

CEA/DAM, Institut supérieur des études
nucléaires de défense (ISENDé),
Bruyères-le-Châtel
F-91297 Arpajon Cedex, France

Email : chocs@cea.fr

ISSN : 2115-7057 Dépôt légal à parution

La revue est consultable sur

www-dam.cea.fr

sommaire

AVANT-PROPOS 03

INTRODUCTION 04

MAÎTRISE DES INCERTITUDES DE MESURE 06

Réfractométrie laser pour la mesure de pression dynamique infrasonore 06

R. KARCHER, G. BOISSEAU, P. VINCENT

Étalonnage des diagnostics plasma du Laser Mégajoule 08

A. LEJARS, G. SOULLIÉ, P. GRUNNING

Première mesure de sensibilité spectrale d'une caméra à balayage de fente X 10

S. HUBERT, F. BOUBAULT

Amélioration des mesures d'impulsion sur l'installation César 12

N. SZALEK, B. BICREL, A. GALTÉ, J. GARDELLE, H. GARNIER, M. VIDEAU

Incertitudes liées à la dégradation de matériaux exposés à un flux thermique 14

T. BUSIER, G. RAMBAUD

Mesure de la surface spécifique du TATB et incertitude associée 16

C. LAGNY, A. FORZY, L. AUTISSIER

Estimation du continuum d'un spectre gamma par observation de ses minima locaux 18

K. THIS, A. FRIGERIO, S. COLAS, L. LE BRUSQUET, P. BONDON

Maîtrise des incertitudes pour la caractérisation des déchets radioactifs 20

G. LELAIZANT, G. CAPRICE

MESURES DE DIMENSIONS ET DE DÉFORMATIONS 22

Incertitudes de mesure sur une machine à mesurer tridimensionnelle 22

G. THÉVENEAU, M. CADIGNAN, G. LANIER

Contraintes résiduelles de fabrication d'une maquette 24

G. HUCHET, S. ALEXANDRE, B. DELMAS, J.-P. HÉRAIL, J.-M. LECHAT, O. PHILIPPE, A. UGUEN

Développement d'un moyen de cartographie de matériaux d'épaisseur micrométrique 26

O. RAPHAËL, V. SCHILLINGER, P. TANGUY, M. RENARD, K. DI ZAZZO, J. MARLIEN

Système de métrologie tridimensionnel des cibles du Laser Mégajoule 28

R. DU JEU, B. FOURTON, M. MARTIN, T. CAILLAUD

MESURES TEMPORELLES ET VÉLOCIMÉTRIQUES 30

Vélocimètre laser multiplexé en longueurs d'onde sans diaphonie optique 30

Y. BARBARIN, G. LE BLANC, M. ROUDOT, J. LUC

Mesure de vitesses par vélocimétrie homodyne en triature 32

J.-M. CHEVALIER, C. LACOSTE, S. ÉVEILLARD, M. MIKART, B. JODAR

Développement d'un système de vélocimétrie hétérodyne multiplexée 34

J. BÉNIER, V. GUYOT

Métrologie de chaînes d'acquisition électriques sur le Laser Mégajoule 36

V. TRAUCHESSEC

Moyens métrologiques pour la mesure d'accélération de choc 38

M. LAVAYSSIÈRE, A. HOTTELET, M. TECHENEY

MESURE DES PROPRIÉTÉS DE LA MATIÈRE ET DES CHAMPS 40

La cellule à enclumes de diamant en mode dynamique 40

R. ANDRÉ, C. PÉPIN, F. OCCELLI, P. LOUBEYRE

Le centre NV : un capteur quantique multifonction 42

L. TORAILLE, T. PLISSON, F. OCCELLI, P. LOUBEYRE, A. HILBERER, M.-P. ADAM, M. SCHMIDT, J.-F. ROCH

Mesure des vitesses du son en conditions extrêmes 44

A. FORESTIER, G. WECK, P. LOUBEYRE, F. DATCHI

MESURES NUCLÉAIRES ET ENVIRONNEMENTALES 46

Innovations majeures pour la mesure des radionucléides et la surveillance du Tice 46

A. CAGNIANT, P. GROSS, G. DOUYSSET, S. TOPIN

Étalonnage de films radiochromiques pour la radiographie par proton 48

I. LANTUÉJOL, B. VAUZOUR, A. DUVAL, N. GRANTAIS, B. MARCHET, C. REVERDIN, J. BRISSET, S. MARTINEZ, M. OSMOND, C. VARIIGNON, G. BOUTOUX

Monitoring dynamique de l'impact des activités industrielles 50

N. SAUREL, L. POIRIER-HERBECK, E. LAHALLE, S. MARCOS

Étalonnage sur site des systèmes de mesure infrasonore 52

S. K. KRISTOFFERSEN, A. LE PICHON, S. DENIS, M. SCHWARDT, B. ALCOVERRO

Détecteur à fibre optique du débit de dose des installations d'irradiation 54

J. VIDALOT, P. PAILLET, A. MORANA, S. GIRARD

IMAGERIE, CINÉMATOGRAPHIE ET TOMOGRAPHIE 56

Endommagement des 7 000 optiques du Laser Mégajoule 56

G. HALLO, F. GAUDFRIN, C. LACOMBE, V. BEAU, J. NÉAUPORT, F. HILD

Métrologie des caméras à balayage de fente X du Laser Mégajoule 58

T. CHIRAC, L. RÉMY

Caractérisation dimensionnelle de pièces élémentaires par tomographie 60

A. CHOUX, N. ARLUSSON, R. BÉCHIR, A. GUINARD, F. LAMY

Mesure de masse volumique de mousses de cuivre par tomographie X 62

A. ROYER, R. CAPIAU

Imagerie laser d'une onde de souffle 64

D. PLOUHINEC, S. MAQUEDA, D. CAPDEVILLE

avant-propos

Garantir les performances et la sûreté des têtes nucléaires, concevoir les chaufferies embarquées des sous-marins et porte-avions, lutter contre la prolifération nucléaire et le terrorisme ou encore dimensionner les futures installations nucléaires repose, à des degrés divers, sur une méthodologie de simulation. Pour accomplir leur mission dans chacun de ces domaines, les équipes de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA utilisent quotidiennement des résultats expérimentaux pour valider les résultats simulés ou assurer que les réalisations sont conformes aux spécifications. La maîtrise des incertitudes de mesure est donc au cœur des activités des centres de la DAM. Il était donc naturel que pour le 6^e forum Métrologie à la DAM, le thème de la métrologie au service de la garantie soit retenu par le directeur scientifique.

C'est dans le périmètre de toutes les missions de la DAM que les six thématiques du forum ont été choisies, principalement dans un objectif de garantie de performances des produits, de sûreté de fonctionnement d'installations ou de surveillance de l'environnement.

Au cours des deux journées organisées les 4 et 5 octobre 2022 au centre DAM Île-de-France, 21 contributions orales et 22 posters ont été présentés par les cinq centres DAM.

Le forum Métrologie a mis en perspective la maîtrise des processus de mesure et de leurs incertitudes associées. Ce numéro de la revue *Focus*, qui regroupe 30 des 43 contributions sous forme d'un article de deux pages chacune, valorise la qualité des travaux réalisés dans toutes les unités de recherche de la DAM.

Je vous souhaite une bonne lecture.

Jean-Philippe VERGER

Directeur du centre DAM Île-de-France



introduction

C'est avec beaucoup de plaisir que j'ai pris part les 4 et 5 octobre 2022 à la sixième édition du forum Métrologie à la Direction des applications militaires (DAM) du CEA. Cet événement important de la vie scientifique et technique de la DAM a, en effet, comme beaucoup d'autres, pâti de la pandémie du Covid et, après les éditions de 2009, 2010, 2011, 2013 et 2015, sept années se seront écoulées pour que la manifestation initialement prévue en mars 2020 puisse finalement avoir lieu dans les locaux du Très Grand Centre de calcul (TGCC) à Bruyères-le-Châtel. J'en profite pour saluer ici la persévérance des organisateurs du centre DAM Île-de-France qui n'ont jamais cessé de travailler à ce projet malgré la crise sanitaire et les bouleversements qu'elle a occasionnés.

Pour comprendre pourquoi le forum Métrologie est un événement important de la vie scientifique et technique de la DAM, il suffit de rappeler à quel point les démarches de garantie par la simulation se sont généralisées au fil des années au sein de notre direction. Tous les programmes de la DAM cherchent aujourd'hui à tirer parti du triptyque modélisation physique – simulation numérique – validation expérimentale, tous ont donc besoin de mesures fiables et maîtrisées. Or, la métrologie est à la fois la science de la mesure et la science de l'évaluation des incertitudes de mesure. Elle est indispensable à l'optimisation des chaînes de mesure et d'interprétation ainsi qu'à la quantification des incertitudes qui sont des piliers de la stratégie scientifique de la DAM.

La DAM met en œuvre et au besoin développe des outils spécifiques qui lui permettent de détecter ou caractériser au niveau requis et avec une précision conforme aux besoins exprimés par chacun de ses programmes.

Pour profiter pleinement des bénéfices de ces démarches, les programmes de la DAM peuvent s'appuyer sur le retour d'expérience issu du programme Simulation. Ce programme, lancé après l'arrêt des essais nucléaires, s'appuie sur deux moyens expérimentaux d'exception, l'installation de radiographie Epure sur le centre de Valduc et le Laser Mégajoule (LMJ) sur le centre du Cesta. Ces moyens permettent de mettre au point, puis de valider les modèles physiques et numériques reproduisant le fonctionnement de la charge nucléaire, car ils offrent la possibilité d'expériences « intégrales », c'est-à-dire représentatives du besoin final, et donc complexes et multiphysiques. Ils correspondent donc au stade ultime de la validation expérimentale, aboutissement de programmes pluriannuels jalonnés d'expériences élémentaires. Ces expériences se concentrent sur une physique ou sur un phénomène d'intérêt et donnent accès à des données de base (équations d'état, lois de comportement, sections efficaces, opacités, conductivités thermiques, permittivités diélectriques, perméabilités magnétiques, susceptibilités, etc.). Elles sont conduites au sein de la DAM ou sur des installations extérieures (synchrotrons, lasers de puissance, XFEL, etc.). Bien au-delà du seul programme Simulation, ce type d'expériences est aujourd'hui au cœur des programmes de la propulsion nucléaire, de la gestion des matières nucléaires, de la non-prolifération ou de la défense conventionnelle.

Toutes ces installations sont équipées de diagnostics de mesure et d'une instrumentation associée dont les performances se situent souvent aux frontières de l'état de l'art. Ces diagnostics fournissent bien sûr les résultats, mais aussi les conditions de l'expérience (pression, température, spectres, chronométrie, etc.), informations sans lesquelles son exploitation serait impossible. Au-delà des démarches de garantie par la simulation, par exemple pour la lutte contre la

prolifération ou la surveillance de l'environnement, la DAM développe aussi des capteurs et des chaînes de mesure au meilleur niveau mondial. Ils rendent possibles l'exploitation de traces infimes et la caractérisation de signatures en cohérence avec l'évolution potentielle des menaces.

Dans ses cinq centres et dans tous les domaines techniques nécessaires à ses missions, la DAM met ainsi en œuvre et au besoin développe des outils spécifiques – capteurs, diagnostics, chaîne de traitements, moyens d'étalonnage et de calibration – qui lui permettent de détecter ou caractériser au niveau requis et avec une précision conforme aux besoins exprimés par chacun de ses programmes. La métrologie de ces différents instruments est un maillon

essentiel de la crédibilité scientifique et technique de la DAM, que les résultats soient exploités en interne ou partagés avec ses partenaires académiques, industriels ou étatiques.

À une telle activité, transverse par essence, le forum Métrologie offre une belle occasion de partage des bonnes pratiques et de confrontations du retour d'expérience, que ce soit dans le domaine expérimental pur ou dans celui de son exploitation et de la simulation. Les 43 contributions – 21 présentations orales et 22 posters – couvrant l'ensemble des activités techniques de la DAM ont été réparties en six sessions :

- ▶ session 1 (p. 6 à 21) : incertitudes de mesure dans les domaines du comportement des matériaux, de la caractérisation des composants d'une chaîne de mesure ou des mesures d'environnement ;
- ▶ session 2 (p. 22 à 29) : mesure de dimensions et de déformations pour la fabrication de maquettes et d'édifices expérimentaux ;
- ▶ session 3 (p. 30 à 39) : mesure de vitesses et de références temporelles ;
- ▶ session 4 (p. 40 à 45) : mesure des paramètres constitutifs des matériaux et des champs électromagnétiques ;
- ▶ session 5 (p. 46 à 55) : mesures nucléaires et environnementales des programmes Simulation et de surveillance de l'environnement ;
- ▶ session 6 (p. 56 à 65) : travaux de R&D en imagerie, cinématographie et tomographie pour les mesures et la caractérisation des produits fabriqués par la DAM.

Ces deux journées ont été complétées par la visite de laboratoires du centre DAM Île-de-France que je remercie pour leur accueil.

Pour conclure, je ne peux que répéter ma très grande satisfaction d'avoir pu constater que ce 6^e forum Métrologie à la DAM permettait de renforcer encore les échanges entre les différentes équipes de la DAM chargées de la conduite des expériences et de leur exploitation, et ce au bénéfice certain de la garantie des performances ou de la surveillance de l'environnement et de la lutte contre la prolifération. Ce numéro 8 de la revue *Focus* donne une bonne idée de la richesse des études conduites à la DAM et de la diversité des programmes qui lui sont confiés, et la métrologie illustre à merveille le haut niveau d'exigences scientifiques et techniques qui anime ses équipes. De grâce, n'attendons pas sept ans avant la prochaine édition !



Olivier VACUS

Directeur scientifique du CEA - DAM

Réfractométrie laser pour la mesure de pression dynamique infrasonore



R. Karcher
G. Boisseau
P. Vincent

CEA - DAM,
centre DAM Île-de-France

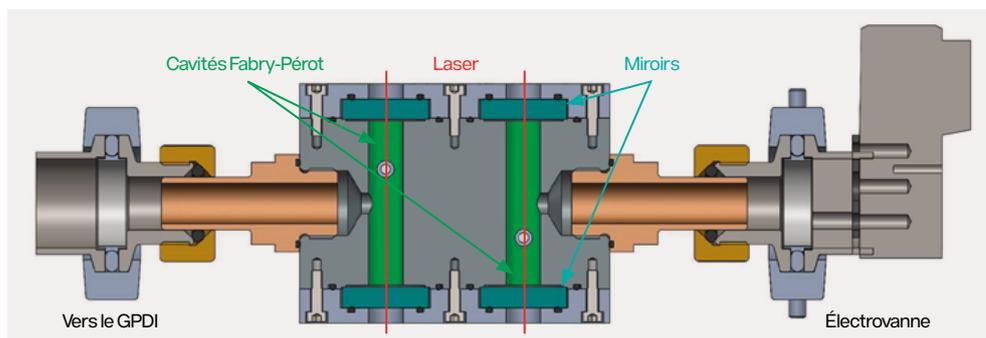
La mesure de pressions dynamiques infrasonores est une application clé du CEA - DAM qui participe à l'élaboration et l'exploitation du Système de surveillance internationale (SSI) pour couvrir les exigences opérationnelles de l'Organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Otice). Le niveau de confiance dans les résultats de mesure est un critère majeur pour l'analyse des données. Afin d'améliorer les moyens d'étalonnage des capteurs pour garantir ce niveau de confiance, le CEA - DAM développe un étalon de transfert de type réfractomètre laser basé sur la mesure dynamique de l'indice de l'air dans une cavité Fabry-Pérot.

La demande de mesures de pressions dynamiques dans le domaine des infrasons, c'est-à-dire d'ondes sonores de fréquences inférieures à 20 Hz, a émergé ces dernières années car ces signaux présentent un intérêt majeur, dans le cadre de l'Otice, et également pour l'étude et la surveillance géophysique (volcans, séismes). Une application clé provient de la nécessité de répondre aux exigences de l'Otice qui déploie et exploite un réseau global de surveillance afin de s'assurer du respect du Traité d'interdiction des essais nucléaires. C'est pourquoi le niveau de confiance attendu des mesures effectuées avec des capteurs infrasonores est un critère majeur de qualité de l'analyse et pour la prise de décision sur la scène internationale. Le CEA - DAM développe ce type de capteurs, appelés microbaromètres, qui équipent plus de 80 % des stations infrasonores de ce réseau. Il est également chargé de leur vérification métrologique conformément aux spécifications de l'Otice.

Afin de répondre à cet enjeu, le CEA - DAM et le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) ont développé, conçu et validé un générateur de pression dynamique infrasonore (GPDI) comme étalon primaire ainsi que son modèle étalon analytique qui décrit le comportement acoustique des cavités cylindriques à basse fréquence **1**. Dans le but de compléter la chaîne métrologique, il est essentiel de concevoir un étalon de transfert traçable au système international d'unités capable d'établir le lien entre pression dynamique acoustique et pression statique.

Le CEA - DAM a conçu un réfractomètre laser relatif **2**, adapté à ses moyens d'étalonnage et capable de mesurer une pression dynamique infrasonore. Il est constitué de deux cavités Fabry-Pérot jumelles (**figure 1**) dans lesquelles deux lasers à 1 550 nm sont injectés et asservis. Une des deux cavités est couplée à une électrovanne permettant l'égalisation

figure 1
Vue en coupe
de la mécanique
de la double cavité
Fabry-Pérot.



des grandeurs statiques environnementales et sert de référence une fois fermée. La seconde cavité, dite de mesure, est couplée à un GPDI (**figure 2**). La mesure de la fréquence du battement optique entre les deux lasers correspond à la mesure de la différence d'indice entre les deux cavités. Ainsi, lorsque la cavité de mesure est soumise à une pression dynamique par une excitation infrasonore du GPDI, le battement optique est l'image de la pression dynamique dans la cavité de mesure. En effet, une loi semi-empirique énoncée par Edlén en 1968 et revisitée en 1998 **3** permet de faire le lien entre température, pression, hygrométrie, taux de CO₂, longueur d'onde et variation d'indice dans l'air.

La réponse en fréquence du réfractomètre laser a été mesurée puis comparée avec un microbaromètre (MB3) et un microphone de référence (HBK type 4193) sur une large bande de fréquences entre 0,001 et 300 Hz. Ces résultats sont présentés dans la bande d'intérêt de l'Otice entre 0,01 et 10 Hz sur la **figure 3**. Le MB3 et le HBK type 4193 présentent une réponse caractéristique avec une coupure aux basses fréquences. Celle du réfractomètre laser révèle une transition pour les fréquences supérieures à 0,1 Hz et montre une réponse plate aux basses fréquences avec des écarts-types conformes aux exigences de traçabilité. Si le modèle étalon du comportement acoustique des cavités cylindriques présuppose une pression uniforme pour sa résolution à basse fréquence **1**, la température acoustique (générée par la dilatation et la compression dynamique du gaz) varie

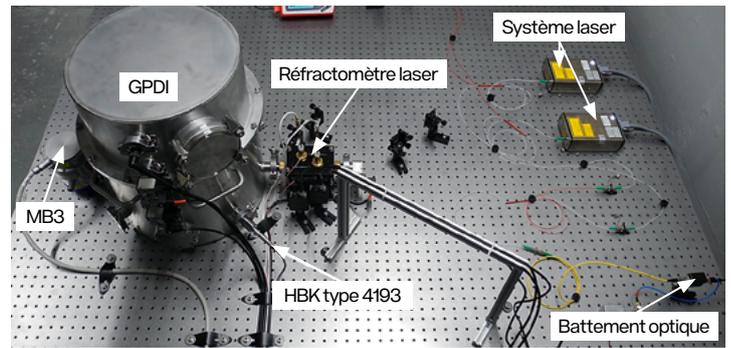


figure 2 Photographie du banc de mesure présentant un générateur de pression dynamique infrasonore couplé à un microbaromètre (MB3), un microphone (HBK type 4193) et au réfractomètre laser.

de manière significative dans les couches limites de la cavité Fabry-Pérot de mesure. Il est nécessaire d'inclure l'influence de la température acoustique (de l'ordre du millikelvin), responsable de la transition au-dessus de 0,1 Hz dans la réponse en fréquence, en amplitude et en phase du réfractomètre laser (**figure 3**).

Le réfractomètre laser ici présenté est un excellent candidat pour devenir l'étalon de transfert de la métrologie des pressions dynamiques infrasonores, grâce à sa traçabilité au système international d'unités et à sa large bande de mesure, faisant ainsi le lien entre le domaine quasi statique et l'acoustique.

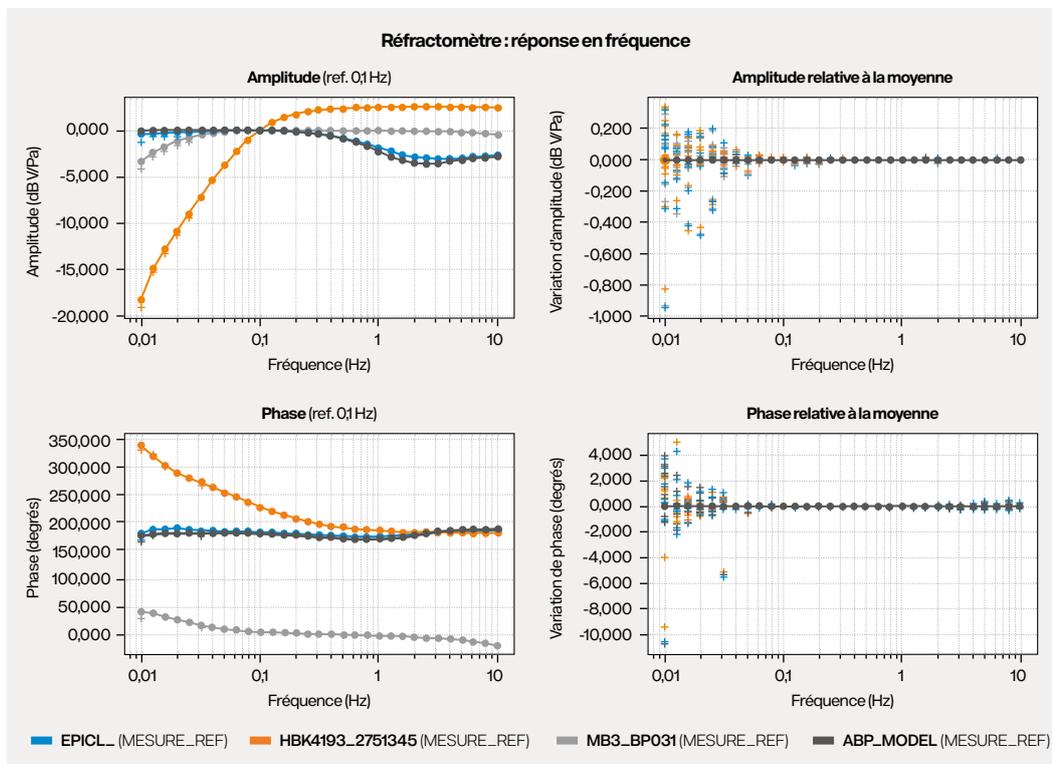


figure 3 Réponses en amplitude (dB V/Pa) et en phase (degrés) d'un microbaromètre (MB3), d'un microphone (HBK type 4193) et du réfractomètre laser (EPICL) normalisées à 0,1 Hz. La réponse théorique du réfractomètre laser est également tracée (ABP_MODEL) et présente un bon accord avec la mesure. Les graphiques de droite correspondent aux amplitudes et phases relatives à la répétabilité de mesure.

RÉFÉRENCES

1 D. RODRIGUES *et al.*, « A laser pistonphone designed for absolute calibration of infrasound sensors from 10 mHz up to 20 Hz », *Metrologia*, 60, n° 1, 015004 (2023). **2** P. F. EGAN *et al.*, « Performance of a dual Fabry-Perot cavity refractometer », *Optic Letters*, 40, n° 17 (2015). **3** G. BÖNSCH, E. POTULSKI, « Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae », *Metrologia*, 35, p. 133-139 (1998).

Étalonnage des diagnostics plasma du Laser Mégajoule



A. Lejars
G. Soullié
P. Gruning

CEA – DAM,
centre DAM Île-de-France

Des équipements de mesure appelés diagnostics plasma sont déployés et mis en œuvre par le centre DAM Île-de-France sur des installations laser de puissance (Laser Mégajoule, Omega). La métrologie des composants X de ces diagnostics nécessite le recours à des équipements légers comme des générateurs X, mais aussi l'accès à de grandes installations comme les synchrotrons, en particulier Soleil à Saclay et Bessy II en Allemagne. Environ 600 composants par an sont ainsi étalonnés, ce qui représente une dizaine de semaines de faisceau synchrotron par an. Dans le cadre de la certification ISO 9001 de la métrologie au CEA – DAM, les logiciels de traitement de mesure ont fait l'objet d'une validation approfondie avec des tests automatisés.

Le programme Simulation repose en partie sur des expériences de physique permettant de contraindre les codes de calcul. Ces expériences sont notamment menées au Laser Mégajoule (LMJ) pour l'étude de la phase de fonctionnement nucléaire des armes. Cette installation est également ouverte à la communauté scientifique internationale pour des expériences d'astrophysique de laboratoire ou de recherche sur la fusion par confinement inertiel pour la production d'énergie.

Lors d'une expérience laser-plasma, les faisceaux laser interagissent avec la cible, modifient sa densité et sa température et lui permettent d'atteindre l'état d'un gaz ionisé, appelé plasma. Pour contraindre efficacement les codes, il est nécessaire de déterminer les conditions expérimentales le plus précisément possible. Pour cela, les conditions initiales de l'expérience sont déterminées avec une métrologie fine des cibles et des diagnostics laser qui caractérisent l'impulsion de lumière délivrée par l'installation.

Les diagnostics plasma sont capables d'utiliser la lumière ou les particules (neutrons, protons, etc.) émises par le plasma et d'acquérir ainsi une image ou un spectre. Pour une expérience typique au LMJ, la température du plasma est de l'ordre du million de degrés et une grande partie du rayonnement émis est ainsi dans le domaine des rayons X. Ces derniers sont donc un vecteur important d'information. Par exemple, en mesurant le spectre d'émission X, il est possible d'en déduire la quantité d'énergie laser absorbée par le plasma. Cette mesure n'est cependant pas triviale. En effet, pour contraindre efficacement les codes de calcul, une mesure absolue est nécessaire, ce qui augmente fortement le besoin en métrologie des diagnostics. Les spectromètres X dédiés à cette mesure sont de type large bande **1** et délivrent un spectre qui est découpé en une vingtaine de bandes, correspondant à autant de voies de mesure. Ils sont cependant massifs, jusqu'à deux tonnes et 12 m de long, ce qui nécessite de réaliser l'étalonnage individuel des composants pour ensuite reconstituer la réponse de l'ensemble.

Chaque voie est constituée d'un filtre, d'un miroir et d'un détecteur. Le filtre est une feuille métallique de quelques microns d'épaisseur et joue le rôle de passe-bande. La transmission parasite à haute énergie est atténuée par un miroir. La combinaison d'un filtre et d'un miroir permet de sélectionner une bande d'énergie de quelques centaines d'électronvolts de largeur. Pour garantir la réponse de chaque composant, l'étalonnage doit être effectué dans le domaine spectral d'utilisation. Cette métrologie peut être réalisée sur un banc interne avec une source constituée d'un générateur X émettant une large bande spectrale et d'un spectromètre. Le faible flux ainsi que la résolution du spectromètre limitent cette approche d'étalonnage de filtres de bande spectrale supérieure à 1 keV (longueur d'onde de 1,24 nm). Pour l'étalonnage des autres composants, à l'heure actuelle, la seule solution permettant à

la fois une résolution spectrale et un flux adapté est l'utilisation d'une ligne de lumière synchrotron équipée d'un monochromateur.

Le CEA – DAM possède un accès privilégié à la ligne Métrologie du synchrotron Soleil grâce à une convention de collaboration pluriannuelle. Chaque année, ce sont environ 400 filtres, 150 miroirs et 20 détecteurs qui sont étalonnés sur cette installation. Cet effort mobilise plusieurs personnes pendant une dizaine de semaines par an. Certaines optiques nouvellement développées sont parfois l'objet d'une intercomparaison (**figure 1**) avec une seconde installation, comme la ligne FCM du synchrotron Bessy II en Allemagne, afin d'augmenter le niveau de garantie.

Un second type de diagnostic plasma nécessite une métrologie de pointe : les imageurs X **2**, qui permettent par exemple d'acquérir des images de l'implosion d'une cible. Pour former une image suffisamment grande sur le détecteur, un microscope est utilisé. Le grandissement est réalisé par un ou plusieurs miroirs à surface torique. Le domaine spectral impose d'utiliser un angle d'incidence très rasant, de l'ordre de $\theta = 1^\circ$, voire moins. L'empreinte du faisceau sur le miroir éclairé doit cependant rester suffisamment petite pour que la surface soit considérée comme plane. Ainsi, une taille de faisceau d'une centaine de microns est nécessaire. Seule une installation synchrotron offre ce niveau de

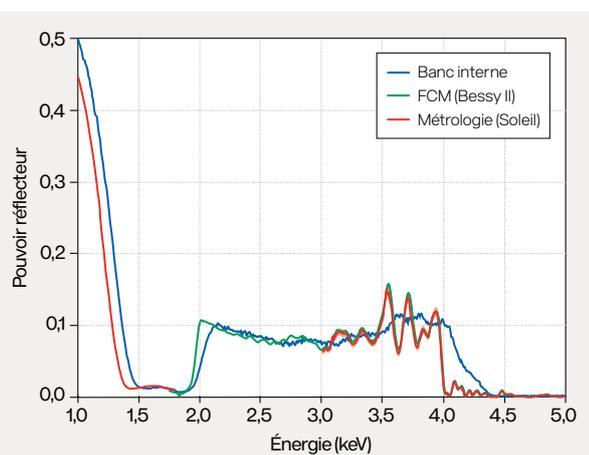


figure 1

Étalonnage d'un miroir (miroir passe-bande 2-4 keV à $1,9^\circ$) sur un banc interne et sur deux lignes de lumière synchrotron différentes : ligne Métrologie (Soleil) et ligne FCM (Bessy II). Le banc interne présente un bon accord global nonobstant une résolution spectrale limitée, ce qui explique le lissage des oscillations dans le domaine allant de 3 à 4 keV.

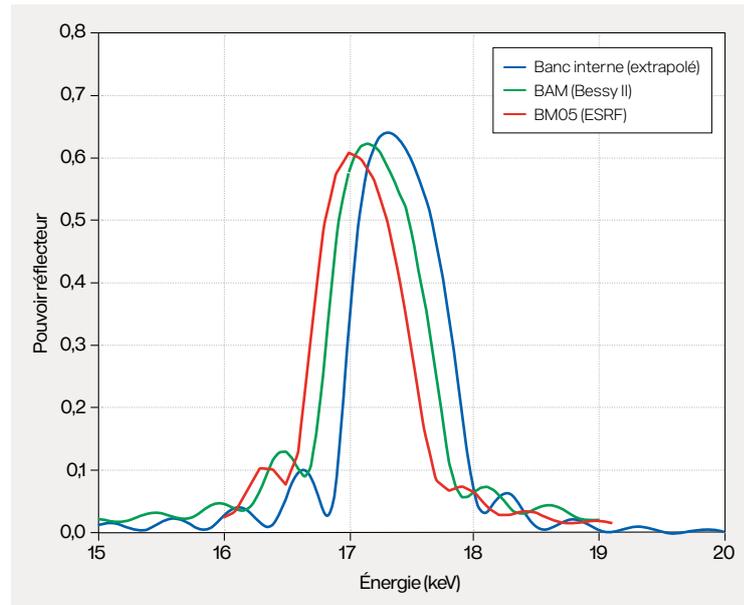


figure 2

Étalonnage d'un miroir ($\theta = 0,6^\circ$) sur deux lignes de lumière synchrotron différentes : BAM (Bessy II, Allemagne) et BM05 (ESRF, Grenoble). L'accord est globalement satisfaisant en dépit des difficultés d'alignement. La mesure avec un banc interne utilise un générateur X et nécessite une extrapolation limitant l'accord.

brillance tout en étant accordable en énergie. Lors d'un balayage en énergie, le réalignement du miroir torique (six degrés de liberté) est souvent indispensable. Ces étalonnages délicats font parfois l'objet d'un second étalonnage de confirmation, par exemple sur la ligne BM05 du synchrotron ESRF à Grenoble (**figure 2**).

La volumétrie de la métrologie annuelle nécessite d'utiliser des logiciels adaptés. Ces derniers ont été développés au CEA – DAM et s'appuient sur des standards de l'industrie : *Python*, *Qt*, *NumPy* pour leur pérennité. Un effort important a été mené pour qualifier les logiciels de dépouillement au moyen de tests automatisés, ce qui permet de garantir le traitement du signal au fil des versions. Les tests unitaires sont menés avec des *doctests*. Le logiciel, dans son ensemble, est qualifié par des scripts *Sikulix* permettant de simuler la saisie de l'utilisateur, tels les clics souris et les entrées clavier. Cette approche permet de garantir en un seul test à la fois l'interface graphique et le traitement du signal. Chaque logiciel de traitement est validé par une vingtaine de tests représentatifs de cas réels.

Les étalonnages sont ensuite stockés dans une base de données qui est par la suite utilisée par les utilisateurs de diagnostics plasma lors du dépouillement des expériences. Cette base de données contient l'historique des étalonnages, ce qui permet également de dépouiller d'anciennes expériences avec par exemple un traitement du signal amélioré.

RÉFÉRENCES

- 1** J.-L. BOURGADE, B. VILLETTE, J.-L. BOCHER *et al.*, « DMX: An absolutely calibrated time-resolved broadband soft X-ray spectrometer designed for MJ class laser-produced plasmas », *Review of Scientific Instruments*, **72**, p. 1173-1182 (2001). **2** J.-L. BOURGADE, P. TROUSSEL, A. CASNER *et al.*, « A versatile high-resolution x-ray imager (HRXI) for laser-plasma experiments on OMEGA », *Review of Scientific Instruments*, **79**, n° 10, p. 10E904 (2008).

Première mesure de sensibilité spectrale d'une caméra à balayage de fente X



S. Hubert
F. Boubault
CEA - DAM,
centre du Cesta

Le CEA - DAM œuvre à la réalisation d'expériences laser-matière de plus en plus complexes, grâce au Laser Mégajoule, dans le but de porter la matière dans des conditions de pression et de température extrêmes. La compréhension des phénomènes physiques impliqués requiert une multitude d'instruments d'analyse qui se doivent d'être étalonnés en absolu pour une interprétation quantitative la plus juste possible. Dans le domaine des rayons X mous ($E \leq 1$ keV), le CEA - DAM développe ainsi depuis plusieurs années des équipements de mesure spécifiques, destinés entre autres à permettre l'étalonnage d'un certain type de caméra X qui résistait jusqu'en 2022 à tout étalonnage pertinent.

Dans le cadre des expériences de haute densité d'énergie réalisées sur l'installation Laser Mégajoule (LMJ), l'analyse du rayonnement X émis par le plasma ainsi produit est d'une importance capitale. C'est la raison pour laquelle les deux tiers des équipements de mesure appelés diagnostics plasma déployés autour de la chambre d'expériences du LMJ analysent ce rayonnement. Pour s'assurer d'une bonne compréhension des phénomènes physiques impliqués au moyen d'une confrontation des mesures avec des codes de calcul, ces diagnostics plasma sont préalablement étalonnés en absolu. Néanmoins, l'étalonnage de certains détecteurs les équipant, comme les caméras à balayage de fente X (CBFX), était jusqu'à présent irréalisable, du fait de difficultés expérimentales considérables. Depuis 1983, seules quatre tentatives ¹⁻⁴ ont été menées dans le monde avec des résultats très mitigés (incertitude de mesure de 10 à 50 %), légitimant l'utilisation palliative d'un modèle semi-empirique ⁵ par les laboratoires internationaux.

Une caméra à balayage de fente est une caméra ultrarapide (résolution d'environ 1 ps) qui permet de fournir une image spatio-temporelle du phénomène observé. Elle utilise pour cela un convertisseur photon X-électron, dénommé photocathode. Dans le domaine du rayonnement X, les photocathodes peuvent être soit métalliques, par exemple en or, soit de type isolant, par exemple en iodure de césium (CsI). La réponse spectrale de la CBFX dépend essentiellement des matériaux constituant la photocathode. Les photocathodes des CBFX du LMJ sont composées de trois couches de matériaux différents : Lexan™, aluminium et CsI. La dimension spatiale du signal de la caméra est fournie par une fente d'entrée de largeur 200 μm . L'énergie cinétique des électrons est ensuite convertie en énergie visible, *via* un écran luminaire, enregistrée par une caméra CCD (*charge-coupled device*).

Le principe d'étalonnage d'une caméra dans le domaine X est semblable à celui utilisé en optique classique : la sensibilité à une énergie E est fournie par le rapport entre l'intensité du signal vu par la caméra et l'intensité mesurée par un détecteur de référence. Mais sa mise en œuvre est nettement plus complexe dans le domaine X. Le travail sous vide secondaire ($< 10^{-6}$ mbar) constitue une première barrière pratique débouchant sur des CBFX de dimensions significatives : 1 200 mm de long, 300 mm de diamètre pour environ 100 kg. Pour étalonner entre autres les CBFX du LMJ dans le domaine des X mous (≤ 1 keV), nous avons développé un monochromateur spécifique (Sympax) ayant la capacité d'interchanger sous vide secondaire deux détecteurs embarqués simultanément : un détecteur de référence et la caméra à étalonner. L'étage de monochromatisation utilise un réseau concave de 2 400 traits/mm,

de rayon de courbure 1 m, sous incidence rasante (3°). L'étage de permutation embarquant les détecteurs se déplace le long du cercle de Rowland (cercle de même rayon de courbure que le réseau sous-tendu par sa surface). Les deux difficultés majeures rencontrées pour l'étalonnage d'une CBFX résident : (i) dans la capacité à venir centrer et à maintenir la fente d'entrée de la caméra centrée sur l'axe de diffraction du monochromateur ; (ii) dans la capacité d'extraction des charges collectées par la CCD issues des seuls pixels ayant reçu des photons X.

La première difficulté est prise en charge par les capacités mécaniques du monochromateur qui permet des déplacements avec des résolutions par pas moteur de $10\ \mu\text{m}$ le long du cercle de Rowland et de $3\ \mu\text{m}$ pour le mouvement de permutation, qui assure également le centrage précis de la fente d'entrée sur l'axe de diffraction. La seconde difficulté a nécessité d'adapter l'algorithme de photométrie d'ouverture (APO) [6], utilisé en astrophysique pour extraire la luminosité absolue des étoiles, à la forme rectangulaire du signal X recueilli par la CBFX (figure 1).

Au terme de huit mois cumulés, la première courbe de sensibilité spectrale d'une CBFX équipée d'une photocathode en CsI a été obtenue sur la plage 0,18-1,253 keV, avec une incertitude moyenne de $\pm 3,8\%$.

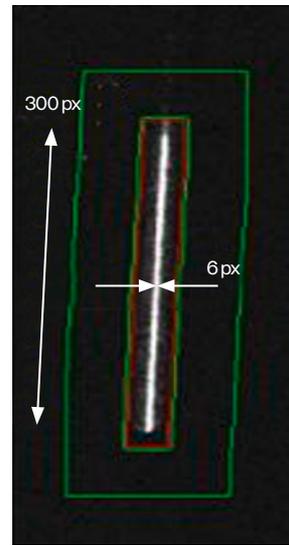


figure 1
Exemple de signal X enregistré par la caméra à balayage de fente X (CBFX).

La figure 2 montre la courbe ainsi obtenue comparée au modèle de Henke pour lequel un désaccord est clairement visible. Une modification de ce modèle fournit une tendance nettement plus en accord avec les points expérimentaux.

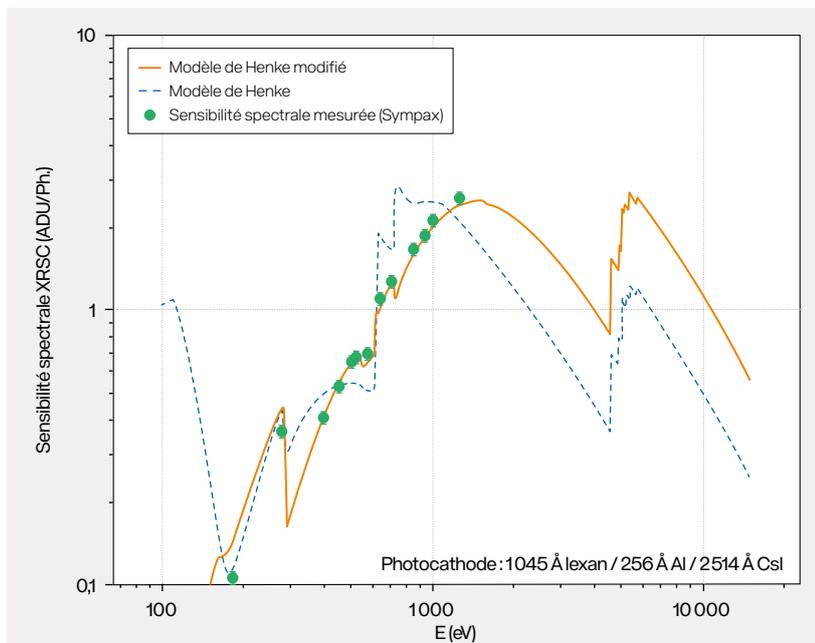


figure 2
Première courbe de sensibilité spectrale expérimentale d'une CBFX sur l'installation Laser Mégajoule, comparée au modèle de Henke et à sa version modifiée établie par le CEA - DAM.

RÉFÉRENCES

- 1 R. L. KAUFFMAN *et al.*, « Quantitative intensity measurements using a soft X-ray streak camera », *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-19, n° 4, p. 616-621 (1983).
- 2 V. P. LAZARCHUK *et al.*, « Calibration procedures for X-ray streak cameras and elements of X-ray measuring circuits », *Instr. Exp. Techn.*, 47, n° 2, p. 255-259 (2004).
- 3 M. NAKAI, « Absolute calibration of a soft X-ray streak camera », *Proc. SPIE, 30th annual technical symposium*, San Diego, p. 144-149 (1986).
- 4 J. YU *et al.*, « A new method to calibrate the absolute sensitivity of a soft X-ray streak camera », *Rev. Sci. Instr.*, 87, 123506 (2016).
- 5 B. L. HENKE *et al.*, « The characterization of x-ray photocathodes in the 0.1-10 keV photon energy region », *J. Appl. Phys.*, 52, n° 3, p. 1509-1520 (1981).
- 6 S. B. HOWELL, « Two-dimensional aperture photometry: Signal-to-noise ratio of point-source observations and optimal data-extraction techniques », *Publ. Astr. Soc. Pac.*, 101, p. 616-622 (1989).

Amélioration des mesures d'impulsion sur l'installation César



N. Szalek
B. Bicrel
A. Galtié
J. Gardelle
H. Garnier
M. Videau
CEA – DAM,
centre du Cesta

Afin de caractériser le comportement des matériaux à la suite d'un dépôt d'énergie par le faisceau d'électrons de l'installation César, située au centre CEA – DAM du Cesta, nous utilisons un système appelé chariot permettant de tenir la cible en place jusqu'au moment du tir. Lorsque la cible reçoit le dépôt d'énergie, elle met en mouvement l'ensemble, dont la vitesse est mesurée par vélocimétrie hétérodyne. Nous avons constaté que le comportement du chariot détériorait la mesure de la vitesse et avons adapté sa géométrie pour nous affranchir de ce biais.

Dans le cadre du durcissement thermomécanique, il est important de connaître et de savoir modéliser le comportement de différents matériaux. Pour cela, des expériences sont menées sur l'installation César afin de recaler les modèles théoriques des équations d'état des matériaux. César est un générateur de haute puissance pulsée qui, couplé à une diode, produit un faisceau d'électrons intense (800 keV, 300 kA, 60 ns). Une fois extrait de la diode à l'aide d'un champ magnétique, le faisceau est transporté sur quelques centimètres jusqu'à une cible; il y est aussi focalisé par le champ. Cela permet d'atteindre des fluences énergétiques très fortes, de l'ordre de 600 cal/cm². Lorsque le faisceau dépose son énergie dans le matériau de la cible, un choc se produit dans celle-ci et sa mise en mouvement par la vaporisation de la face avant produit un effet fusée (impulsion).

Récemment, nous sommes parvenus à augmenter la fluence maximale possible sur César pour atteindre plus de 600 cal/cm² **1** et permettre d'accéder à de nouvelles conditions de température et de pression au sein des matériaux. Pour caractériser dans ces conditions le comportement d'un matériau, nous utilisons un système de vélocimétrie hétérodyne qui mesure la vitesse de la face arrière de la cible, mise en mouvement par le choc. L'échantillon est placé dans un ensemble appelé chariot qui se déplace sans contrainte dans la chambre

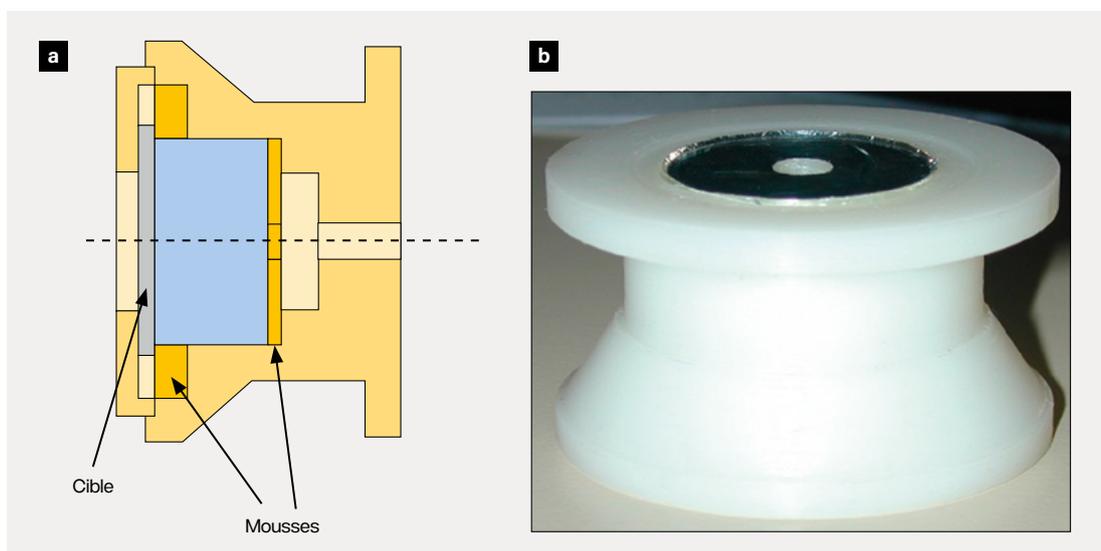
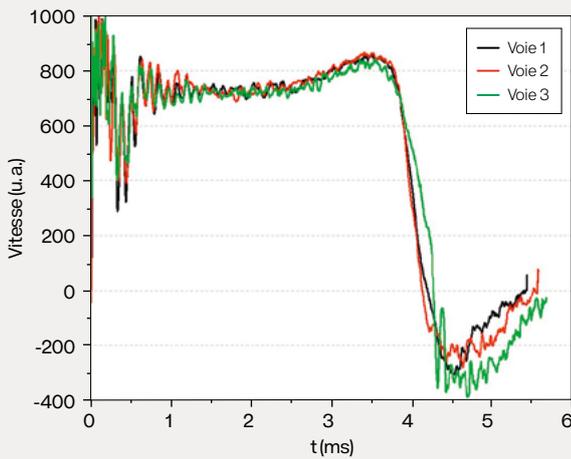


figure 1

a Schéma et **b** photographie de l'ensemble appelé chariot servant à caractériser des impulsions transmises par des matériaux ayant subi un dépôt d'énergie par le faisceau d'électrons de César.


figure 2

Exemple de mesure de vitesse atteinte par le chariot présenté sur la **figure 1** après qu'il a été poussé par une cible ayant subi un dépôt d'énergie par le faisceau d'électrons de César.

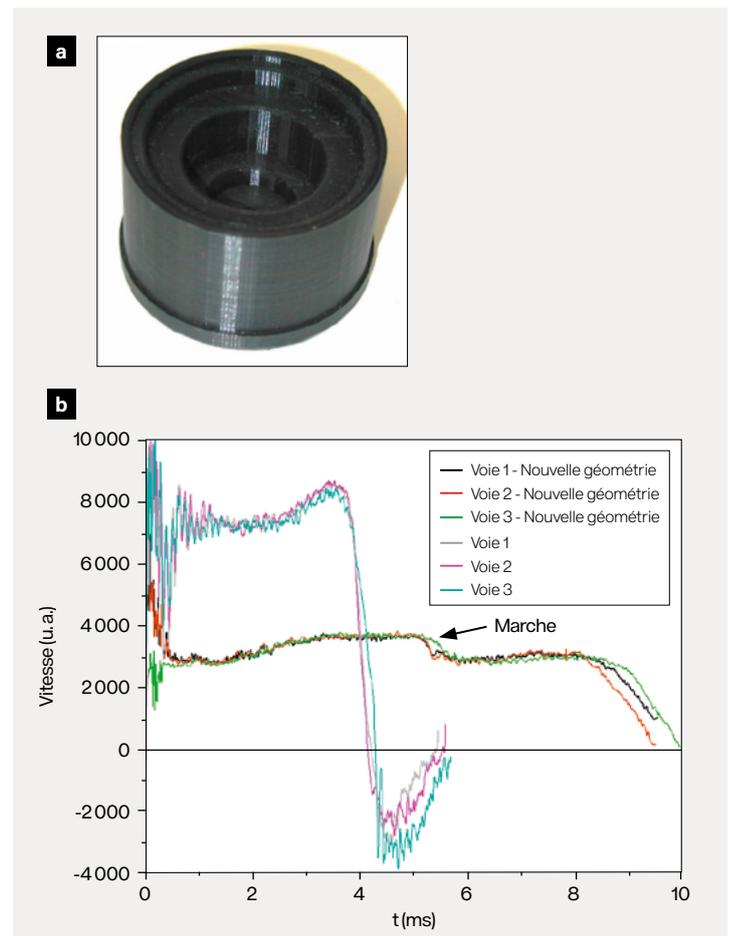
d'expériences après la vaporisation de la face avant de l'échantillon. Le même système de vélocimétrie mesure simultanément la vitesse de la face arrière de l'échantillon et la vitesse atteinte par ce chariot. Cette mesure est réalisée en trois points de la face arrière de ce dernier. Un schéma du chariot dans la chambre d'expériences est présenté sur la **figure 1** et un exemple de vitesse atteinte par le chariot sur la **figure 2**. Le système est équipé de butées pour protéger le système de mesure et une chute de vitesse aux alentours de 4 ms est ainsi observée lorsque le chariot les atteint.

L'impulsion est ensuite calculée à partir de la vitesse du plateau de la **figure 2**, de l'énergie déposée par le faisceau, calculée à partir des signaux de courant et de tension et de la masse de l'ensemble qui vole. Nous avons constaté que des oscillations, visibles entre 0,5 et 1,5 ms, s'établissaient après la mise en mouvement initiale. Leur fréquence était d'environ 8 kHz et nous avons cherché à savoir si ces oscillations étaient produites par la mise en mouvement du chariot par effet fusée.

Pour essayer de comprendre le phénomène, une analyse modale du chariot avec le code Abaqus a été réalisée. Les résultats ont montré que celui-ci possédait un grand nombre de modes propres dans la gamme allant de 5 à 15 kHz. En particulier, deux modes à 10 et 11 kHz correspondent à un mouvement longitudinal oscillant de la face arrière du chariot. Plusieurs pistes étaient envisageables : un changement du matériau pour en utiliser un plus rigide ou un changement de la géométrie du chariot. D'autres simulations avec Abaqus en mode explicite nous ont guidé vers une géométrie visible sur la **figure 3a**. Nous avons utilisé ce chariot et effectué une mesure dans les mêmes conditions que précédemment. La vitesse de vol du chariot, présentée sur la **figure 3b** au côté de l'ancienne mesure, met en évidence une nette amélioration avec la disparition des oscillations sur le plateau de vitesse. En revanche, en raison de l'ajout de matière et donc de masse à

l'ensemble en vol, la vitesse atteinte sur le plateau a diminué et le chariot vole plus longtemps.

Les travaux présentés ici ont permis de montrer que les oscillations observées sur la vitesse du chariot étaient des perturbations liées au diagnostic lui-même. En effet, les simulations réalisées avec le code Abaqus ont suggéré que les oscillations étaient dues à la structure du diagnostic (structure et matériau). Les expériences menées par la suite sur César en utilisant une géométrie différente du chariot ont confirmé cette hypothèse. Malgré cela, il existe sur nos mesures des phénomènes encore incompris, comme la marche de vitesse observée vers 5,5 ms (**figure 3b**).


figure 3

a Photographie du nouveau chariot réalisé par fabrication additive. **b** Vitesses mesurées à l'arrière de ce chariot (en vert, rouge, noir) comparées aux vitesses mesurées avec l'ancien chariot (en rose, cyan, gris).

RÉFÉRENCES

1 J. GARDELLE, B. CASSANY, N. SZALEK, A. GALTÍÉ, B. BICREL, D. HÉBERT, I. BERTRON, K. PEPITONE, « High power electron beam interaction with an aluminum target: Measurements and simulations », *J. Appl. Phy.*, **126**, 153301 (2019).

Incertitudes liées à la dégradation de matériaux exposés à un flux thermique



T. Busier
G. Rambaud
CEA - DAM,
centre de Gramat

La définition des incertitudes pour la mesure de l'évolution de la dégradation de matériaux exposés à un haut flux thermique bref a été réalisée dans le cadre de l'étude du comportement de matériaux semi-transparents soumis à un flux purement radiatif. Ce projet a pour objectif d'étudier l'évolution de l'état de surface de matériaux en fonction de la quantité d'énergie déposée selon des profils temporels courts et intenses. Pour cela, différents profils temporels ont été appliqués à l'aide du concentrateur solaire de la DGA (Direction générale de l'armement), situé à Odeillo.

La dégradation de l'état de surface a été caractérisée en suivant l'évolution de l'absorbance des échantillons à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible-proche infrarouge JASCO V-670. Le concentrateur solaire est composé d'un héliostat qui réfléchit le rayonnement solaire et l'oriente vers la zone d'essais. Le rayonnement solaire traverse ensuite deux atténuateurs : le premier est un atténuateur à panneaux composé de deux portes permettant de modifier l'intensité maximale du flux pouvant atteindre la zone d'essais ; le second est un atténuateur à volets composé de vingt volets verticaux disposés sur plusieurs rangées permettant de moduler temporellement l'intensité du flux solaire incident. Le rayonnement solaire en sortie des atténuateurs converge vers la chambre d'essais grâce au concentrateur. La maîtrise du flux thermique appliqué à l'échantillon provient de divers étalonnages réalisés en statique pour différentes ouvertures des atténuateurs à panneaux et à volets (figure 1). L'équation (1) permet de calculer le niveau de flux théorique \dot{Q} à partir du niveau d'ouverture de l'atténuateur à volet (RV), de la mesure du pyrhéliomètre (\dot{Q}_s) et des coefficients d'étalonnage du four solaire (a et b).

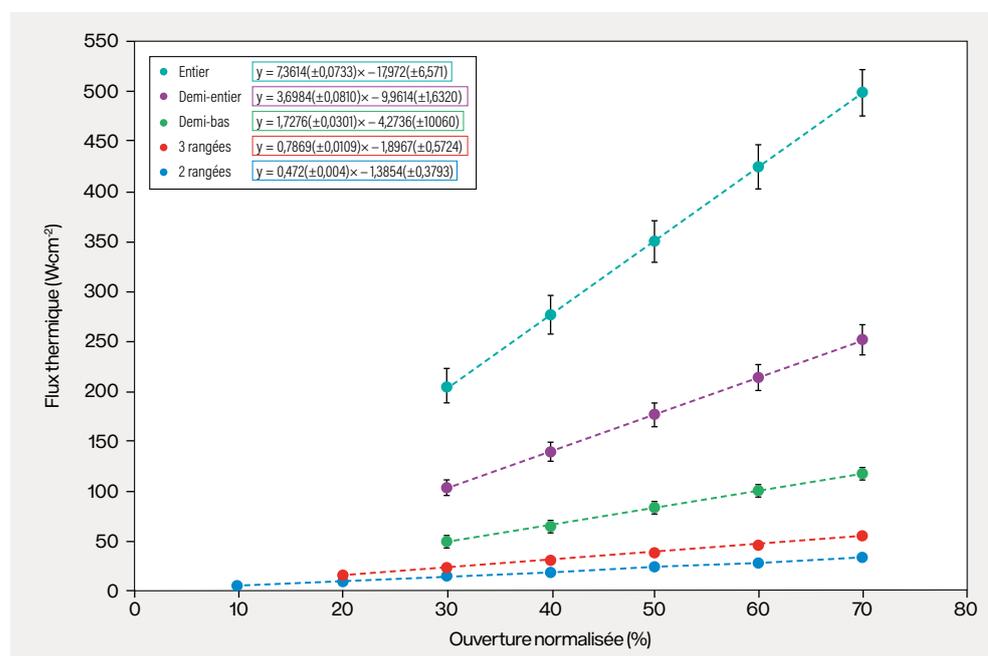


figure 1
Coefficients d'étalonnage du four solaire avec les incertitudes.

$$\dot{Q} = 100a \frac{0,77 - \sin(50 - 0,045RV)}{0,6963 \times \frac{11,246}{2Q_s}} + b \quad (1)$$

Une partie des incertitudes de ce calcul provient de l'étalonnage du four solaire [1]. Les autres sources d'erreur proviennent de la chaîne de mesure qui permet de mesurer la position des volets de l'atténuateur à volets, composée du capteur de position, d'un convertisseur numérique-analogique et de l'afficheur Gen2i. Elles proviennent également de la chaîne de mesure composée du pyréliomètre, d'un convertisseur numérique-analogique, d'un amplificateur et de l'afficheur numérique Gen2i. Les incertitudes de ces deux chaînes de mesure sont calculées à partir des certificats d'étalonnage ou des données constructeur de chaque instrument, en suivant la méthode de propagation des incertitudes du GUM (*Guide of Uncertainty and Measurements*).

Comme indiqué dans l'équation (2), l'incertitude appliquée sur le flux thermique, donnée pour une probabilité de 95 %, est la somme quadratique des incertitudes des quatre coefficients de l'équation (1).

$$u_{\dot{Q}} = 2 \times \sqrt{u_a^2 + u_b^2 + u_{RV}^2 + u_{Q_s}^2} \quad (2)$$

Pour déterminer l'absorbance moyenne des échantillons testés, il a fallu identifier dans un premier temps et pour chaque matériau les différentes zones de dégradation pour mesurer, sur une gamme spectrale de 300 à 2 200 nm, la réflectance R et la transmittance T intégrées [2], puis l'absorbance correspondante. L'absorbance moyenne d'un échantillon est calculée par la moyenne de l'absorbance des zones de dégradation pondérée par la répartition surfacique de chacune d'entre elles sur l'échantillon.

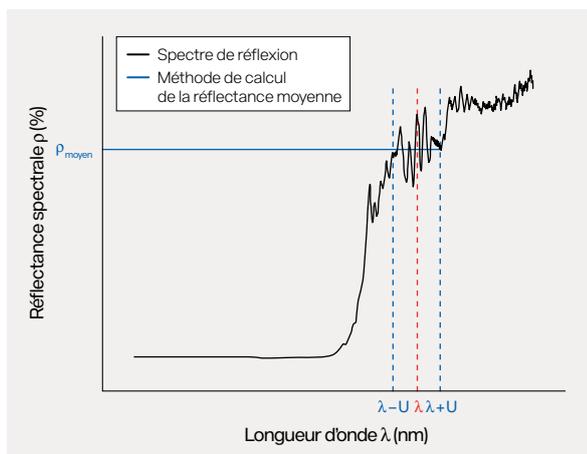


figure 2
Schéma de la méthode de calcul prenant en compte l'incertitude sur la longueur d'onde.

RÉFÉRENCES

- [1] C. RASCON, « Estimation des incertitudes de mesure lors de l'étalonnage du four solaire principal (Odeillo) », note technique, DGA Techniques aéronautiques (2017).
- [2] NORME ISO 9050 : 2003, Verre dans la construction — Détermination de la transmission lumineuse, de la transmission solaire directe, de la transmission énergétique solaire totale, de la transmission de l'ultraviolet et des facteurs dérivés des vitrages.

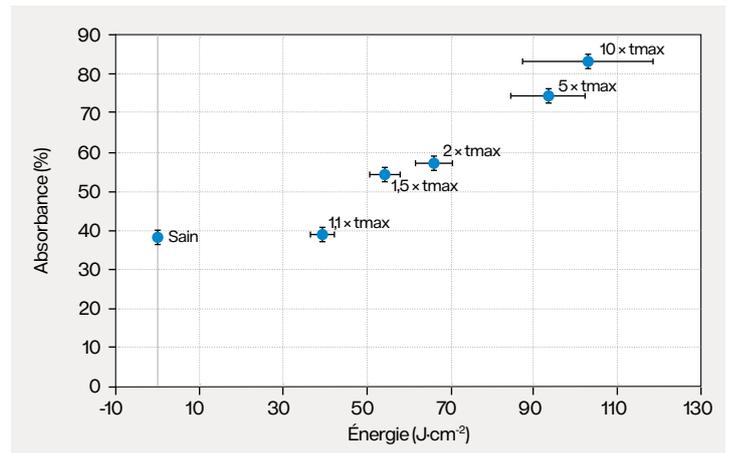


figure 3
Évolution de l'absorbance en fonction de la densité d'énergie pour le matériau 5 et pour un profil temporel donné.

Les incertitudes sont issues d'une part de la mesure des absorbances des différentes zones de dégradation. Les données constructeur du spectrophotomètre permettent de calculer la première partie de cette incertitude en déterminant $u_{\text{étal}}$. Le paramètre lié à la répétabilité $u_{\text{rép}}$ est calculé après une répétition de cinq mesures de la réflectance et de la transmittance. Le dernier paramètre lié à l'erreur sur la longueur d'onde est calculé à partir de la mesure de la réflectance spectrale $\rho(\lambda)$ et de la transmittance spectrale $\tau(\lambda)$ entre 300 et 2 200 nm. Cette incertitude est schématisée sur la **figure 2**, les réflectances spectrales et les transmittances spectrales sont définies par la moyenne dans l'intervalle $[\lambda-U; \lambda+U]$ avec U représentant l'erreur sur la longueur d'onde définie par le constructeur (u_λ).

D'autre part, l'incertitude sur le calcul de l'aire de ces zones de dégradation est également à prendre en compte. Ces mesures ont été réalisées trois fois pour établir une incertitude de répétabilité sur la répartition surfacique (u_{RS}). En suivant la méthode de propagation des incertitudes du GUM, une incertitude sur l'absorbance u_a d'un échantillon est calculée selon l'équation (3) avec une probabilité de 95 %.

$$u_A = 2 \times \sqrt{u_{\text{étal}}^2 + u_{\text{rép}}^2 + u_\lambda^2 + u_{RS}^2} \quad (3)$$

L'association des mesures d'absorbance pour différents niveaux d'énergie appliqués sur l'échantillon est présentée sur la **figure 3**. Ces résultats ont été obtenus pour un profil temporel qui a été tronqué à différents instants pour faire évoluer la quantité d'énergie appliquée. Ils permettent de mettre en évidence que l'augmentation de la quantité d'énergie déposée s'accompagne d'une augmentation de l'incertitude associée, puisque l'énergie est calculée par l'intégration du flux de chaleur appliquée. En revanche, l'incertitude sur l'absorbance est constante, quel que soit le niveau d'énergie appliqué.

Mesure de la surface spécifique du TATB et incertitude associée



C. Lagny
A. Forzy
L. Autissier
CEA - DAM,
centre du Ripault

Le triamino-trinitrobenzène, ou TATB, est une molécule d'explosif utilisée dans les programmes du CEA - DAM. Il se présente sous la forme d'une poudre possédant certaines caractéristiques physico-chimiques. Ces caractéristiques sont systématiquement contrôlées afin de valider la qualité d'un nouveau lot. Parmi elles, la surface spécifique qui influence les performances détoniques du matériau est contrôlée et il est important d'évaluer l'incertitude sur la mesure de cette grandeur. Une méthode d'évaluation a été développée afin d'améliorer la prédiction des performances et la précision des modèles associés.

Le TATB est une poudre constituée de petits grains micrométriques. La surface de ces grains est tortueuse et rugueuse (**figure 1**). Toutes ces porosités ouvertes contribuent à la surface totale accessible à l'air. On parle de surface spécifique, exprimée en m^2/g , pour le rapport entre cette surface totale et la masse de poudre. La surface spécifique joue un rôle dans les propriétés détoniques de l'explosif et sa valeur est spécifiée pour valider l'emploi d'un lot de TATB : elle doit donc être mesurée précisément.

Le principe de la mesure consiste à adsorber un gaz sur une quantité de poudre connue. On évalue la quantité de gaz nécessaire pour former une couche sur toute la surface de l'échantillon, puis des modèles permettent de calculer la surface spécifique ; l'étude du TATB a été faite avec le modèle Brunauer, Emmet et Teller (BET). Pour l'analyse, la poudre est d'abord chauffée et mise sous vide afin de dégazer toutes les espèces déjà adsorbées. L'échantillon est ensuite

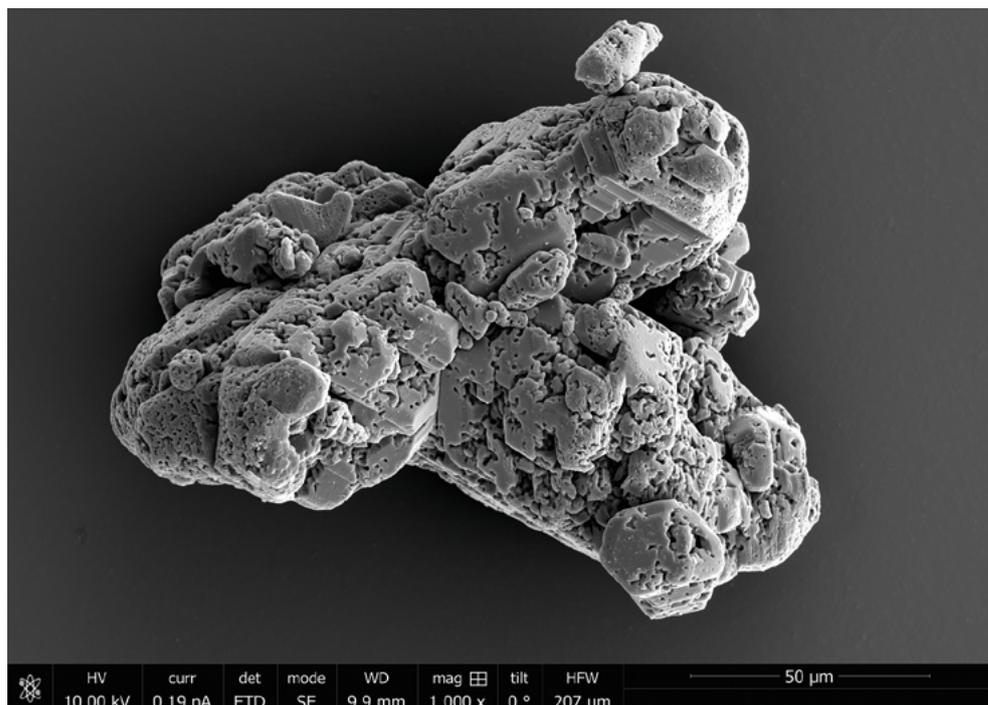


figure 1
Cliché d'un grain de TATB en microscopie électronique à balayage.

refroidi et le gaz de mesure est injecté. Connaissant la quantité de gaz adsorbé à différentes pressions et la masse de l'échantillon, le modèle BET permet de remonter à la surface spécifique. L'incertitude sur la mesure correspond à tout ce qui ne peut pas être maîtrisé dans la phase d'analyse. Étant donné l'intérêt du TATB pour les programmes du CEA – DAM, il est crucial d'évaluer au plus juste cette incertitude.

Afin d'étudier et d'établir l'incertitude recherchée, des documents comme le GUM **1** ou la norme ISO 5725-2 **2** constituent des références incontournables. De plus, des études similaires sur d'autres techniques de caractérisation ont déjà été réalisées au sein du centre du Ripault. Tout cela a servi de base à l'étude de l'incertitude recherchée qui, avant cette évaluation, était estimée à 10 % sur avis d'expert.

Les incertitudes d'une mesure analytique sont classées en deux catégories. On trouve d'un côté l'incertitude dite de type A qui correspond à la distribution statistique des valeurs obtenues lorsqu'on réalise plusieurs mesures. Elle tient compte de l'ensemble des étapes qui mènent au résultat final (opérateur, instruments, etc.) et comprend donc les critères de répétabilité (mesure tout à l'identique sur un laps de temps court) et de reproductibilité (mesure sur des échantillons similaires, mais avec des opérateurs différents par exemple). Pour le TATB, cette incertitude a été évaluée par deux opérateurs mesurant chacun en double six échantillons de poudre d'un même lot. Au total, 24 valeurs de surface spécifique ont été obtenues : l'écart-type de leur distribution fournit l'incertitude de type A.

L'autre catégorie d'incertitude de mesure est dite de type B. Elle prend en compte les sources d'incertitude qui ne sont pas prises en compte dans la catégorie précédente. On peut les estimer en listant de manière exhaustive l'ensemble des facteurs pouvant être des sources d'erreur. Dans le protocole de mesure de surface spécifique, ces sources sont au nombre de quatre : température, pression, masse ainsi que la pente du modèle BET. La température représente un facteur négligeable d'erreur. L'incertitude sur la pression est liée à l'erreur de mesure des capteurs, dont les spécifications sont données par le constructeur. L'incertitude sur la masse correspond à l'erreur de mesure faite avec la balance et déterminée lors de son étalonnage. Enfin, l'incertitude sur la pente du modèle BET provient de la

régression linéaire que celui-ci utilise, comme le montre la **figure 2**. Les résultats de surface spécifique sont obtenus pour chaque échantillon avec un écart-type associé à la détermination de la pente à partir des mesures de pression ; afin d'évaluer l'incertitude sans la minimiser, nous avons pris la plus grande valeur d'écart-type obtenue lors des 24 mesures. L'ensemble de ces trois incertitudes de mesure (pente, masse, pression) permet de calculer l'incertitude de type B.

Il reste à calculer l'incertitude totale de la mesure. Une discussion sur la méthode est possible. On pourrait considérer que, puisque l'on reproduit de multiples fois la mesure pour calculer le type A, on prend déjà en compte l'incertitude sur la masse, la pression, etc., lors de ces manipulations et que tenir compte du type B est redondant. Cependant, pour les applications du CEA – DAM, le choix est fait de maximiser l'évaluation de l'incertitude. L'approche choisie est donc conservatrice, elle consiste à additionner les deux types A et B.

Il ressort de cette étude que l'incertitude relative de mesure de surface spécifique sur le TATB est de l'ordre de 5 %, soit une diminution d'un facteur deux par rapport à ce qui était fait précédemment. Cela revient à donner une valeur sous la forme $0,200 \pm 0,010 \text{ m}^2/\text{g}$. Les trois principales sources d'incertitude sont à égalité le type A, la pression et la pente. Cette étude est valable uniquement dans le cadre qui a été décrit. Pour un matériau différent ou un autre équipement par exemple, il conviendrait de réaliser une nouvelle étude systématique.

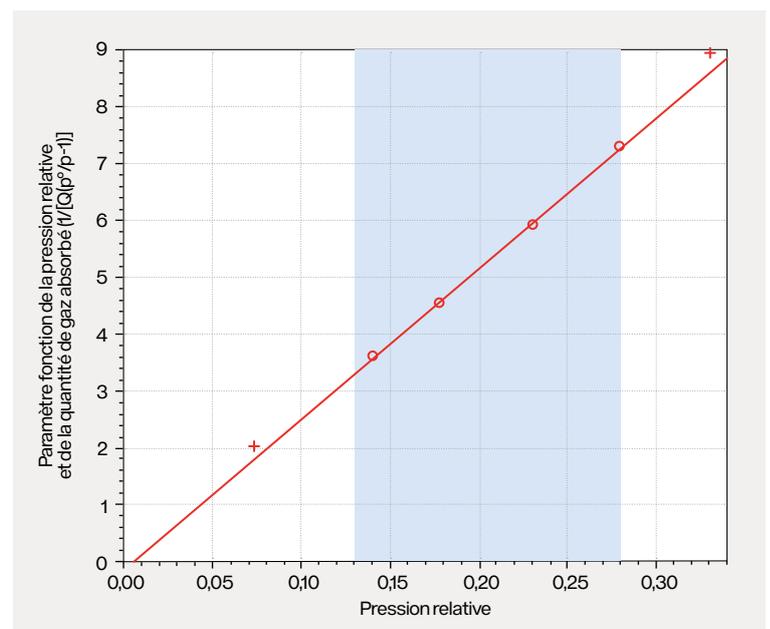


figure 2

Courbe de mesure obtenue avec le modèle BET.

RÉFÉRENCES

1 JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM), *Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*, GUM 1995, 100 p., 19-21 (2008). **2** NF ISO 5725-2, *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure - Partie 2* (2020).

Estimation du continuum d'un spectre gamma par observation de ses minima locaux



K. This
A. Frigerio
S. Colas

CEA - DAM,
centre de Valduc

L. Le Brusquet
P. Bondon

Laboratoire des signaux
et systèmes (L2S),
UMR 8506 CNRS -
Université Paris-Saclay -
CentraleSupélec

La spectrométrie gamma est une technique de mesure nucléaire utilisée pour détecter une source radioactive, identifier sa composition et quantifier son activité. Elle est particulièrement utilisée pour la caractérisation des déchets nucléaires. Un spectre gamma constitue un résultat de mesure brut qui n'est pas interprétable directement, c'est son analyse qui permet d'en extraire l'information utile. La présence d'un continuum non caractérisé est la principale difficulté de l'analyse et la recherche à ce sujet est toujours active. Dans le présent article, il est question d'une nouvelle méthode d'estimation du continuum par l'observation des minima locaux.

La sûreté des installations, la gestion du risque de criticité et le traçage de la matière radioactive requièrent un nombre de mesures important et croissant. Or, les limites des méthodes d'analyse de spectre actuellement disponibles brident l'évolution des capacités de mesure. Afin d'éviter que les activités de production ne soient impactées par ces limitations, le CEA - DAM s'est engagé dans le développement de nouvelles méthodes d'analyse de spectre. Nous présentons ici le principe d'une nouvelle méthode d'estimation du continuum d'un spectre gamma par l'observation de ses minima locaux (pour un exposé détaillé, se reporter à [1](#)). La méthode est simple et accepte une large gamme de résolution de pics : elle est tout aussi compatible avec une mesure réalisée au moyen d'un détecteur semi-conducteur refroidi à l'azote de type germanium hyperpur (GeHP), ayant une excellente résolution, qu'avec un scintillateur solide au bromure de lanthane (LaBr₃), dont la résolution est moins bonne. La [figure 1](#) illustre une application de la méthode à un spectre réel de GeHP.

Le résultat d'une mesure est un histogramme appelé spectre qui répartit les photons détectés dans des canaux correspondant chacun à un intervalle d'énergie. Tous les spectres ont

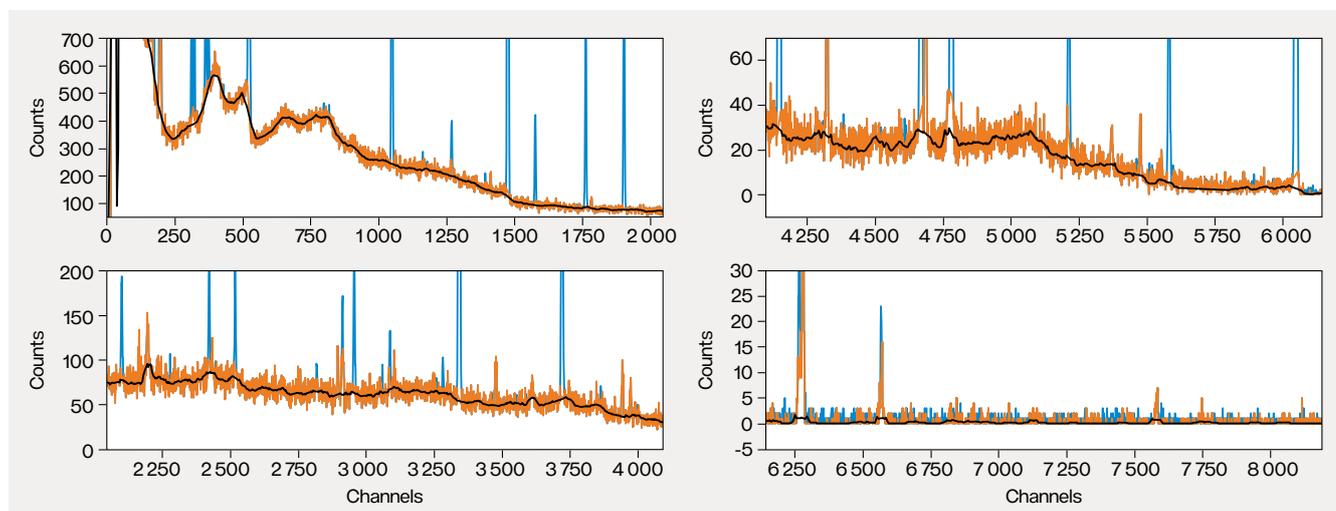


figure 1

Résultat de l'estimation du continuum du spectre représenté de haut en bas depuis les basses jusqu'aux hautes énergies. En bleu, le spectre brut ; en orange, le résultat de l'estimateur de Tervo *et al.* [2](#) ; en noir, le résultat de la nouvelle méthode.

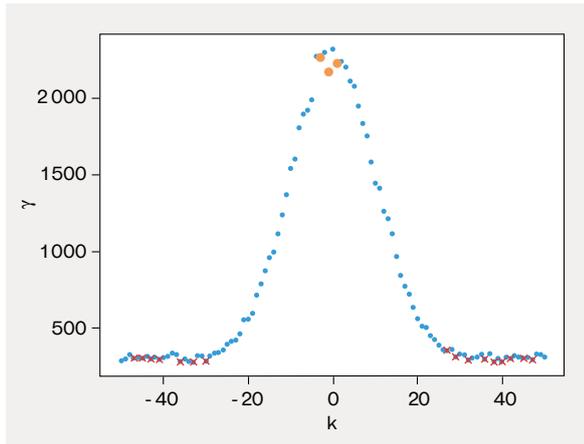


figure 2
 Observation des minima locaux. En bleu l'observation, en rouge les minima locaux du continuum, en orange les minima locaux des sommets.

la même structure, c'est-à-dire une superposition d'un fond avec un mélange de pics spécifiques à certains radionucléides, le tout recouvert par un bruit d'observation. Les pics portent un grand nombre d'informations significatives ou représentatives. À l'opposé, le fond, aussi appelé continuum, car il est plutôt régulier et lisse, contient peu d'informations, car il est la résultante de l'environnement et des caractéristiques du détecteur. Par conséquent, le continuum présente peu d'intérêt. Une des grandes étapes de l'analyse d'un spectre consiste à séparer le mélange de pics du continuum. Si le continuum était connu, il suffirait de le soustraire, c'est le principe des techniques de *background removal* ou *baseline correction*. La difficulté est alors d'estimer le continuum à partir du spectre sans connaître le mélange de pics.

Un pic tel que celui de la **figure 2** peut être décrit par sa topologie : un sommet, deux flancs et deux plats. Les flancs sont caractérisés par leur forte variation. Au contraire, le sommet et les plats sont plutôt constants. Enfin, le niveau du sommet est significativement plus haut que le niveau des plats. Si l'on parvenait à identifier les points des plats, là où le mélange de pic est nul, on pourrait construire une estimation du continuum.

Un minimum local est un canal dont le niveau est inférieur au niveau du canal précédent et du canal suivant. L'observation des minima locaux d'un spectre est simple.

La solution imaginée ici repose sur l'observation d'un phénomène remarquable : les flancs des pics ne semblent pas porter de minima locaux (**figure 2**). En effet, lorsque les variations du signal sont faibles devant le niveau de bruit, la réalisation chaotique du bruit fait apparaître des minima locaux. Mais lorsque le signal non bruité varie fortement par rapport au niveau de

bruit, les sauts du bruit ne suffisent plus : la probabilité d'apparition d'un minimum local diminue drastiquement. La **figure 3** représente l'évaluation par simulation de la probabilité qu'un point soit un minimum local dans le cas d'un signal linéaire de pente γ recouvert par un bruit gaussien d'écart-type σ . On y constate que la probabilité d'apparition des minima locaux est maximale lorsque le signal est stationnaire et qu'elle chute rapidement lorsque γ/σ augmente. Cela confirme notre interprétation.

Lorsque les pics sont larges, par exemple lors d'une mesure avec LaBr_3 , les variations du signal sont faibles et les minima locaux apparaissent sur les flancs des pics. Une solution simple consiste à sous-échantillonner le signal en ne conservant qu'un point sur p points. De cette manière, le taux de variation entre deux points est multiplié par p , alors que le niveau de bruit n'a pas changé. En fait, le sous-échantillonnage est une astuce qui permet de décomposer un pic large en une collection de pics fins ne présentant pas de minima locaux sur leurs flancs. L'estimateur complet implique d'autres opérations qui ne sont pas abordées ici : filtrage des intrus, correction du biais, filtrage du bruit et interpolation du signal.

En conclusion, cette méthode permet une élimination rapide, robuste, adaptative et automatisée du continuum de tout type de spectre gamma. Elle peut être utilisée comme une opération de prétraitement pour l'analyse du mélange de pics. Cependant, cette méthode présente certaines limites lorsque les variations du continuum sont proches des variations des pics, car notre critère de discrimination n'est alors plus opérant (par exemple sur la **figure 1**, entre les canaux 6250 et 6750, une partie de la base des pics est assimilée à tort au continuum).

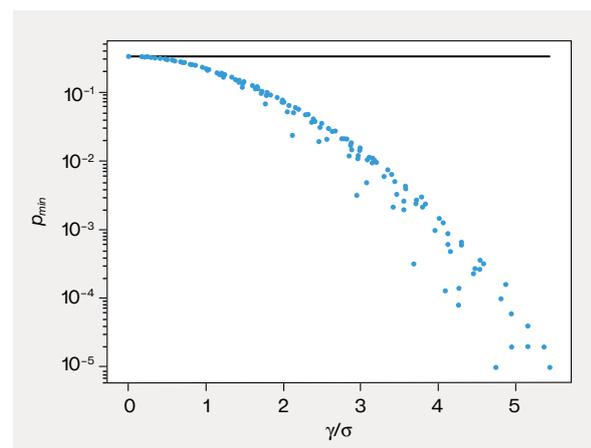


figure 3
 Évolution de la probabilité d'apparition des minima locaux en fonction du rapport γ/σ .

RÉFÉRENCES

- 1 K. THIS *et al.*, « Baseline removal in spectrometry gamma by observation of local minima », *System Theory, Control and Computing Journal*, 1 (1), p. 1-12 (2021).
- 2 R. J. TERVO *et al.*, « An automated background estimation procedure for gamma ray spectra », *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 216, p. 205-218 (1983).

Maîtrise des incertitudes pour la caractérisation des déchets radioactifs

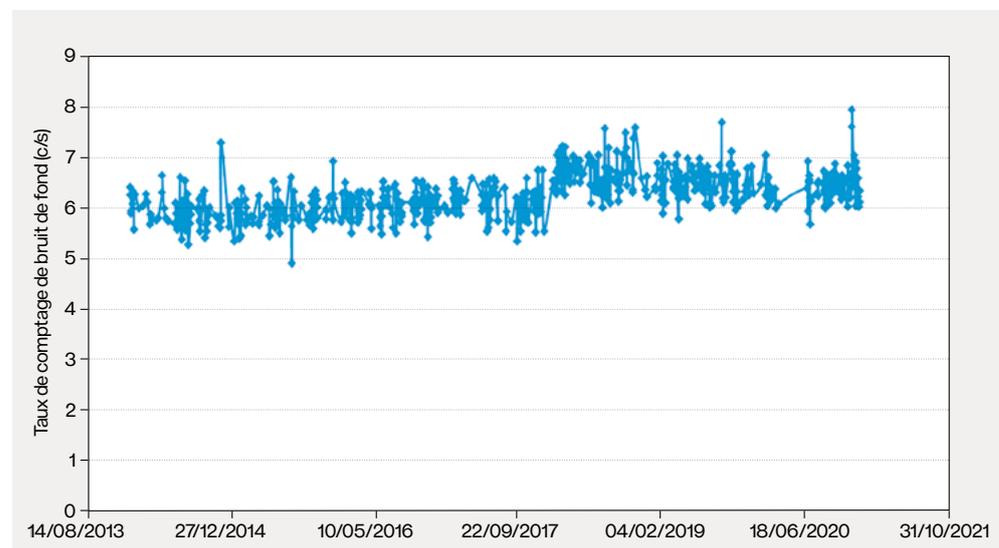


G. Lelaizant
G. Caprice
CEA - DAM,
centre DAM Île-de-France

La caractérisation des déchets radioactifs s'inscrit dans un contexte technique contraint par les exigences de l'Agence nationale de gestion des déchets radioactifs (Andra). Le laboratoire chargé de la caractérisation, de la gestion et de l'évacuation des déchets radioactifs à faible et moyenne activité et à très faible activité produits par les installations individuelles du centre DAM Île-de-France a décliné un plan de validation de sa méthode. Ce plan est destiné à l'évaluation des incertitudes liées aux différents paramètres d'influence de la mesure.

Les exigences de l'Andra définissent une catégorisation des déchets par type de radionucléides présents dans les colis (émetteurs α , β et période radioactive associée) et par niveau de radioactivité; elles manifestent aussi la volonté d'une évaluation raisonnablement majorante des radioactivités. Ainsi, un enjeu majeur réside dans la maîtrise des incertitudes des résultats des différentes méthodes de mesure, comme la spectrométrie γ , mises en œuvre pour identifier les différents radionucléides présents et quantifier leur activité. Notre laboratoire ayant été accrédité Cofrac pour son activité de caractérisation par spectrométrie γ sur colis de déchets depuis 2006 selon la norme NF ISO 19017 [1](#) et sur échantillons en conteneur standard de 500 cm³ depuis 2019, la validation de la méthode de mesure a été déclinée au moyen d'un plan d'expériences de justesse d'une part et de fidélité d'autre part, selon les différentes parties de la norme NF ISO 5725 [2](#). Cette démarche permet d'identifier les paramètres d'influence et d'évaluer les niveaux d'incertitudes associées. Les essais de reproductibilité menés au travers de la participation du laboratoire aux exercices de tests interlaboratoires amènent à une évaluation du biais de mesure

figure 1
Suivi du taux de comptage du bruit de fond (coups par seconde ou c/s) d'une station depuis sa mise en service.



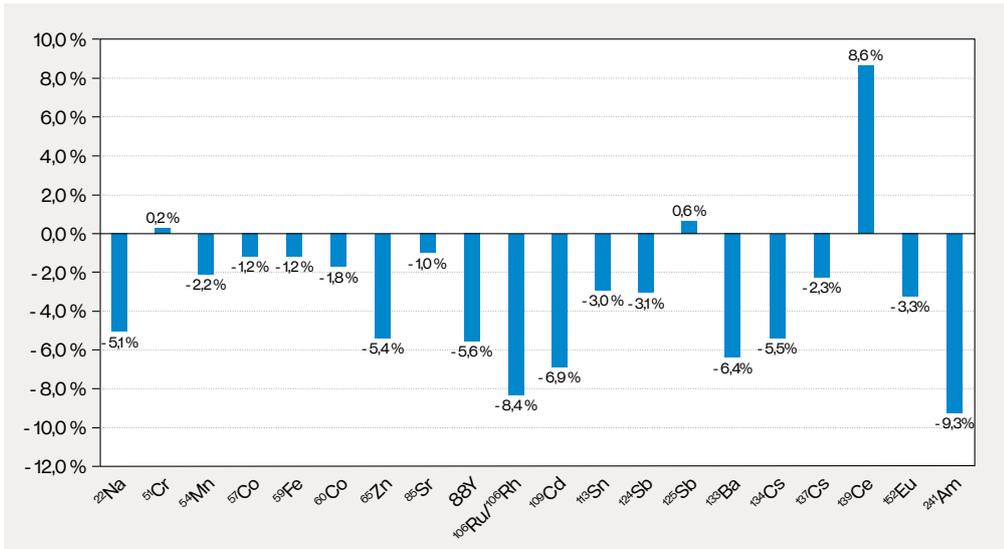


figure 2
Écart relatif moyen à la référence (%) par radionucléide.

pour envisager sa correction systématique au travers des incertitudes.

Selon [2](#), la justesse désigne l'étroitesse de l'accord entre l'espérance d'un résultat de mesure et une valeur vraie, alors que la fidélité désigne l'étroitesse de l'accord entre des résultats de mesure indépendants obtenus dans des conditions déterminées. La valeur vraie n'étant jamais exactement connue, la valeur acceptée comme s'en approchant au mieux est une valeur de référence telle que celle d'un étalon connu ou d'un matériau de référence approprié. La justesse caractérise ainsi une erreur systématique alors que la fidélité permet de quantifier une erreur aléatoire.

La première étape, préalable à la déclinaison des plans d'expériences de justesse et de fidélité, implique une identification exhaustive des paramètres d'influence ou sources d'incertitude. Pour cela, la méthode des 5M a servi de base de répartition de l'ensemble des paramètres dans les catégories Matières, Milieu, Moyens, Méthode et Main-d'œuvre.

Une étude spécifique a ensuite été menée afin de quantifier les écarts relatifs à une référence connue, engendrés par chacun des paramètres d'influence considérés comme sources d'incertitude supposées indépendantes. Un ordre d'importance des paramètres d'influence a ainsi pu être précisé par ce plan d'expériences de justesse.

Pour les paramètres sans référence fixe, tels que les paramètres environnementaux (de milieu) que sont la température ou l'hygrométrie, leur suivi à l'aide de capteurs spécifiques a permis de conforter l'absence de variabilité supérieure à un critère de tolérance de 15 % sur une durée suffisamment longue pour garantir sa représentativité en y intégrant les valeurs extrêmes.

Tous paramètres pris en compte, le suivi des performances métrologiques de spectrométrie gamma que sont l'énergie, la résolution et le rendement, au travers

de cartes de contrôle étudiées mensuellement, traduit le respect de critères de tolérance sur les écarts relatifs à des valeurs de référence connues (extraites de sources étalons ou échantillons ou colis de référence). Un écart-type de justesse est ainsi calculé et permet de conforter la faible variabilité des performances dans le temps ainsi que l'absence de dérive qui serait induite par le vieillissement des équipements ou une instabilité environnementale, par exemple. Une illustration de ce suivi sur le taux de comptage de bruit de fond apparaît sur la [figure 1](#).

La stabilité des résultats d'essai ou répétabilité, traduite par le calcul du meilleur estimateur de variance, se fait au travers de la quantification d'un écart-type de fidélité. La méthode la plus simple pour estimer un écart-type de fidélité est de réaliser une série de n mesures successives sur un même objet de référence, et ce après application du test de Grubbs, couramment utilisé pour écarter les valeurs aberrantes d'un échantillon [2](#). Pour tout niveau de radioactivité, faible ou moyenne, l'écart-type de fidélité n'excède pas 5 % sur les activités des radionucléides d'intérêt.

L'accréditation Cofrac détenue par le laboratoire a entraîné sa participation annuelle à des programmes de tests interlaboratoires externes. L'étude statistique de leurs résultats menée sur plus de quinze ans traduit l'écart-type de reproductibilité (ou biais de la méthode) au travers de trois critères, l'écart relatif à la référence présenté sur la [figure 2](#), l'écart normalisé (écart corrigé de l'incertitude de mesure du laboratoire) et le score-z (répartition des résultats entre les différents laboratoires). Un biais moyen de - 3 % a ainsi été mis en évidence pour la méthode appliquée.

La combinaison des résultats de mesures issues des différentes méthodes mises en œuvre au sein du laboratoire permet également d'améliorer l'évaluation des incertitudes.

RÉFÉRENCES

[1](#) NORME EN ISO 19017, Lignes directrices pour le mesurage de déchets radioactifs par spectrométrie gamma (2017). [2](#) NORME EN ISO 5725, Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure (1994-2020).

Incertitudes de mesure sur une machine à mesurer tridimensionnelle

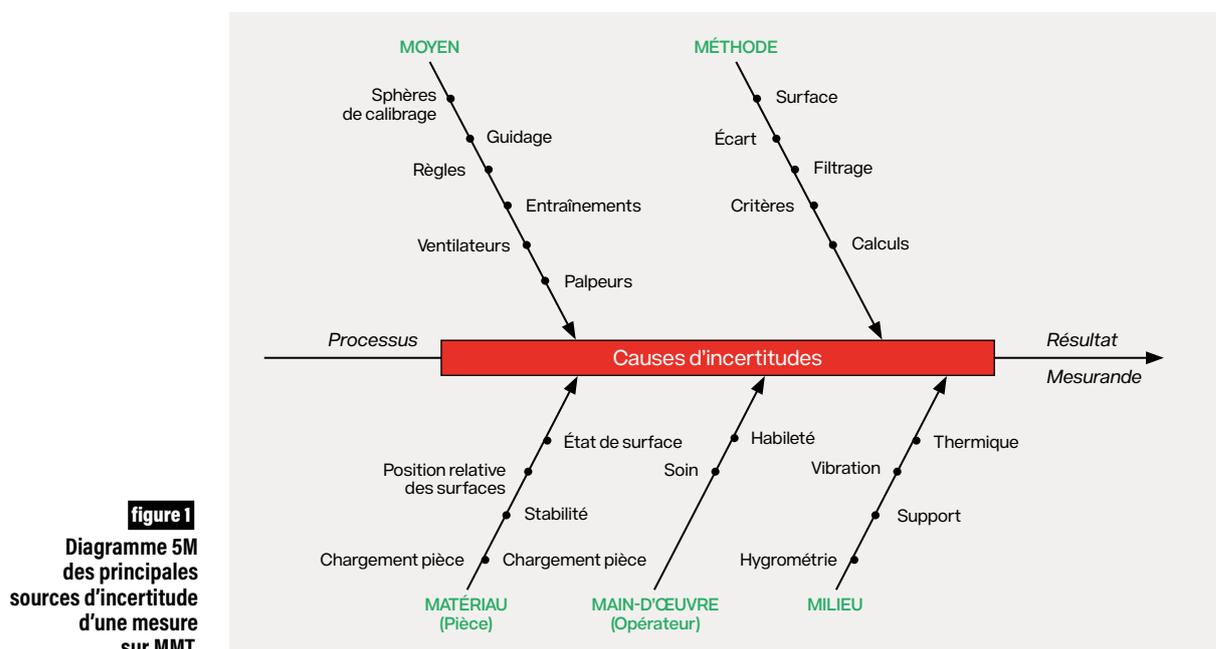


G. Théveneau
M. Cadignan
G. Lanier
CEA – DAM,
centre de Valduc

Du fait de leur justesse et de leur polyvalence, les machines à mesurer tridimensionnelles sont utilisées pour contrôler les paramètres dimensionnels et géométriques définissant les pièces à forte valeur ajoutée. Néanmoins, les incertitudes associées à ces mesures constituent un axe de développement en matière de quantification. La veille technologique a permis d'identifier un logiciel capable de déterminer les incertitudes de chaque paramètre distinctement, de façon fiable et rapide. Le centre CEA – DAM de Valduc s'est donc doté en 2020 de ce logiciel dont les fonctionnalités et les résultats obtenus sont présentés ici.

La méthode de référence pour évaluer une incertitude de mesure est décrite dans le *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* [1]. Néanmoins, elle est difficilement applicable au cas des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), du fait de leur processus de mesure complexe impliquant de nombreuses sources d'incertitude (figure 1). Ainsi, une valeur estimée de $\pm 5 \mu\text{m}$ était systématiquement appliquée, valable sans distinction pour chaque paramètre dimensionnel ou géométrique. Choisie comme suffisamment englobante, cette valeur repose sur des retours d'expérience. Insuffisante au regard des exigences du programme Simulation du CEA – DAM, cette démarche doit évoluer afin de délivrer des incertitudes dimensionnelles les plus justes possibles.

Le logiciel *Virtual Coordinate Measuring Machine* (VCMM, signifiant MMT Virtuelle), dont s'est doté le CEA – DAM, évalue l'incertitude de mesure à partir de simulations de type Monte-Carlo. Le Physikalisch-Technische Bundesanstalt est à l'origine de son développement



depuis les années 1990, en partenariat avec trois industriels de la métrologie : Zeiss, Hexagon et Eumetron. Il est commercialisé sous forme d'extension aux logiciels de pilotage de MMT depuis les années 2010.

La version 1 de VCMM a été installée pour la première fois en France sur une MMT du Centre technique des industries mécaniques (Cetim) de Saint-Étienne en 2014. Devant le besoin d'optimisation des incertitudes de mesure, le centre de Valduc a saisi cette occasion en établissant un contrat de collaboration avec le Cetim. De cette façon, il a pu profiter du retour d'expérience de ce dernier avant une installation en interne, opération qui a été réalisée en 2020 (version 2).

Une phase de qualification du logiciel a suivi l'installation. L'objectif était d'abord de vérifier la justesse des incertitudes fournies par ce dernier avec les nouvelles fonctions et améliorations apportées dans cette seconde version. À l'image de ce que le Cetim avait pu faire, le plan d'expériences a consisté à confronter les incertitudes obtenues par VCMM à des incertitudes de référence obtenues par la méthode normalisée ISO 5725-2 [2](#). Les mesures ont été réalisées et les résultats sont en cours de traitement.

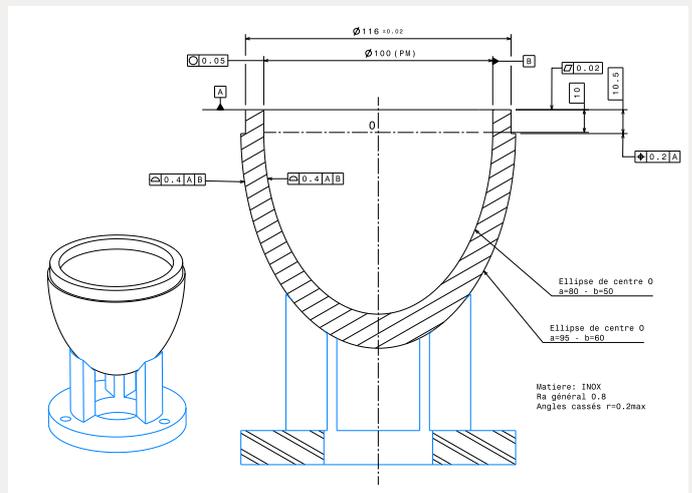
Il s'agissait également d'adapter le logiciel aux méthodes de contrôle habituelles, notamment avec l'utilisation du plateau tournant (4^e axe mesurant). Le logiciel n'est pas conçu pour prendre en compte l'influence de cet élément dans l'incertitude restituée. Un plan d'expériences consistant à comparer les incertitudes obtenues par VCMM en activant et désactivant la fonction de 4^e axe mesurant à partir d'un même programme de mesure a permis d'évaluer cette influence.

Les incertitudes obtenues dans les deux cas sont égales. D'après ce constat, il sera possible d'ajouter une composante d'incertitude « plateau » au résultat fourni par le logiciel VCMM, tel que décrit dans la norme ISO 15530-4 [3](#). Pour l'évaluer, une méthode simple est proposée dans les travaux expérimentaux de Jean-François Manlay [4](#), du centre CEA – DAM de Gramat. Cette façon de procéder a tout de même tendance à fournir une incertitude finale surestimée. En effet, lors de l'utilisation du plateau, les mouvements des autres axes machine sont considérablement réduits. Les incertitudes liées devraient l'être également, ce qui n'est pas le cas, comme cela a été constaté dans le plan d'expériences.

La [figure 2](#) représente la pièce type utilisée pour la qualification du logiciel. Bien que le processus de validation ne soit pas finalisé, les premières valeurs d'incertitude obtenues sont cohérentes et reflètent bien la réalité de la mesure. Par exemple, l'incertitude est plus élevée sur le défaut de forme extérieure qui est contrôlé



figure 2
Bol JFM, pièce type utilisée pour la qualification du logiciel VCMM.



en scanning avec plusieurs stylets ($\pm 5,0 \mu\text{m}$), que sur le défaut de forme intérieure faisant appel à une stratégie en point à point avec un unique stylet ($\pm 1,5 \mu\text{m}$). De même, la coaxialité entre deux cylindres courts présente une incertitude deux fois plus élevée qu'avec une concentricité, du fait de l'instabilité de l'axe généré ($\pm 9,8 \mu\text{m}$ contre $\pm 4,6 \mu\text{m}$).

On comprend ainsi que l'un des intérêts de VCMM sera de garantir davantage la qualité et la fiabilité des contrôles sur MMT. Il permettra également de démontrer la capacité de contrôle rigoureux et au cas par cas. De plus, cette démarche s'inscrit dans le cadre du programme Simulation pour lequel il sera possible de fournir des incertitudes ajustées à chaque paramètre dimensionnel ou géométrique. Enfin, il permet au centre de Valduc de se placer comme un pionnier dans la démarche industrielle de maîtrise des incertitudes dimensionnelles en France.

RÉFÉRENCES

- [1](#) BIPM-JCGM, 100:2008 Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. [2](#) NORME ISO 5725-2:2020, Exactitude des résultats et méthodes de mesure - Partie 2. [3](#) NORME ISO 15530-4:2008, Spécification géométrique des produits - Machines à mesurer tridimensionnelles : Technique pour la détermination de l'incertitude de mesure - Partie 4. [4](#) J.-F. MANLAY, Une approche pratique des incertitudes de mesure en 3D, Métrologie-les techniques-I-80-22 AFNOR éditions (2010).

Contraintes résiduelles de fabrication d'une maquette



G. Huchet
S. Alexandre
B. Delmas
J.-P. Héral
J.-M. Lechat
O. Philippe
A. Uguen
CEA - DAM,
centre du Ripault

Pour les besoins de ses programmes de R&D, le centre CEA - DAM du Ripault a mis en place une démarche alliant calcul et mesure visant à quantifier les chargements thermomécaniques engendrés sur des maquettes assemblées par collage ou revêtues par projection plasma. Des mesures continues ou discontinues de déformation ou de température sont réalisées à l'intérieur ou à l'extérieur des pièces de forme au moyen de jauges, de thermocouples ou de thermoboutons. Des calculs par la méthode des éléments finis permettent ensuite d'identifier et de valider la contribution thermique ou mécanique générée au sein des différentes couches métalliques, céramiques et polymères recouvrant les maquettes.

L'optimisation de la durée de vie des produits évoluant dans des conditions sévères oblige les industriels de l'aéronautique et de l'aérospatial à prendre en compte la notion de contraintes résiduelles non seulement sur les pièces finies, pour des raisons de durabilité, mais également tout au long de la gamme de fabrication afin de maîtriser au mieux l'aspect géométrique **1**. Cette problématique concerne aussi les sous-ensembles développés par le CEA - DAM, qui doit en assurer la maîtrise d'œuvre et la garantie des performances (thermomécaniques entre autres).

Il existe de nombreuses techniques de mesure des contraintes résiduelles destructives, comme les méthodes du contour ou du trou incrémental (MTI), et non destructives, comme la diffraction des rayons X (DRX) ou les ultrasons **1**. D'autres techniques non destructives sont couramment utilisées en aéronautique sur des pièces planes, comme la méthode de la flèche basée sur une mesure de courbure et de température *in situ* ou *a posteriori* de la projection thermique d'un revêtement **2**.

Pour les besoins de ses programmes de R&D, le centre du Ripault a mis en place une démarche alliant calcul et mesure visant à quantifier les chargements thermomécaniques induits sur des maquettes revêtues par projection plasma ou assemblées par collage.

En projection thermique, la méthode de la flèche est difficilement applicable sur des pièces axisymétriques pour des raisons d'encombrement et de faibles variations dimensionnelles. Des mesures de déformation ont donc été réalisées sur un cylindre de rayon interne 76 mm (**figure 1a**), dont la paroi interne métallique a été équipée de jauges biaxiales orientées suivant les directions axiale et circonférentielle. Ainsi, la projection d'un revêtement métallique d'épaisseur 600 μm se traduit par des déformations résiduelles de compression circonférentielle d'amplitude $33 \pm 3 \mu\text{def}$ (1 μdef = déformation de 1 $\mu\text{m}/\text{m}$), soit une diminution de rayon de $2,5 \pm 0,2 \mu\text{m}$ (**figure 1b**) : cette contraction est causée principalement par les contraintes de trempage à cœur du dépôt **2**, évaluées à $40 \pm 20 \text{ MPa}$ à partir de mesures destructives par MTI et méthode de la flèche. Ensuite, la réduction d'épaisseur du dépôt par deux passes d'usinage à sec de 0,1 mm génère des déformations résiduelles de traction d'amplitude $41 \pm 5 \mu\text{def}$, soit une augmentation de rayon $3,1 \pm 0,4 \mu\text{m}$ (**figure 1b**) : cette détente est provoquée par la suppression des contraintes de trempage sur les 200 μm de matière retirée et par l'écrouissage de la surface usinée sur une profondeur de 50 μm **2**.

En assemblage, les jauges d'extensométrie ont également été utilisées pour mesurer les sollicitations mécaniques induites lors d'un collage de pièces coniques, dont la partie mâle métallique est pleine ou creuse et la partie femelle creuse est métallique ou céramique. Dans ce principe de collage par immersion, la résine époxyde est d'abord déposée à l'intérieur de la pièce femelle, avant descente de la pièce mâle jusqu'à l'épaisseur de colle désirée de quelques

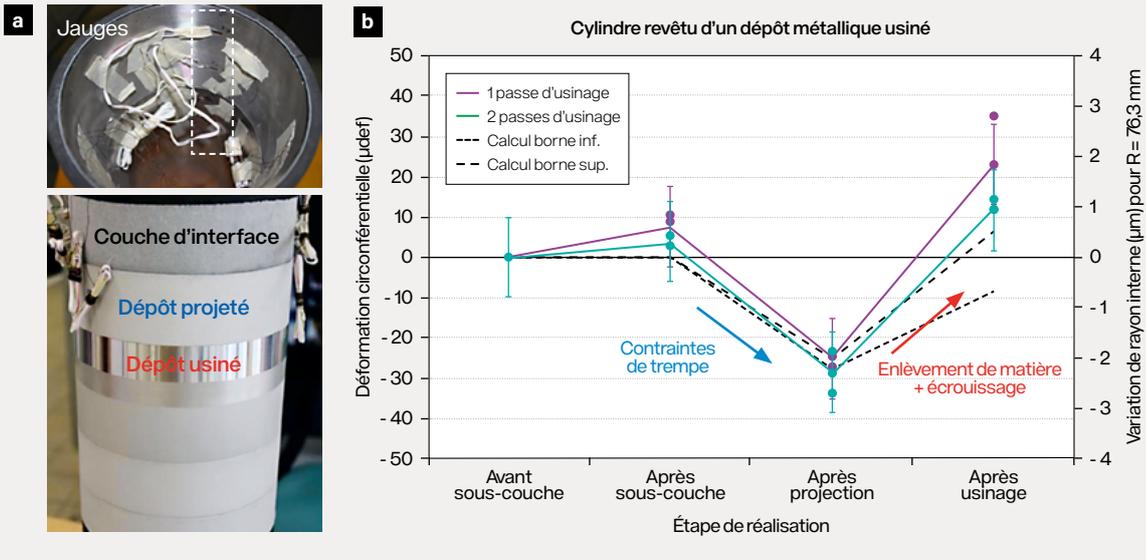


figure 1
a Cylindre revêtu d'un dépôt plasma métallique usiné, avec **b** mesures de déformation interne par jauges d'extensométrie.

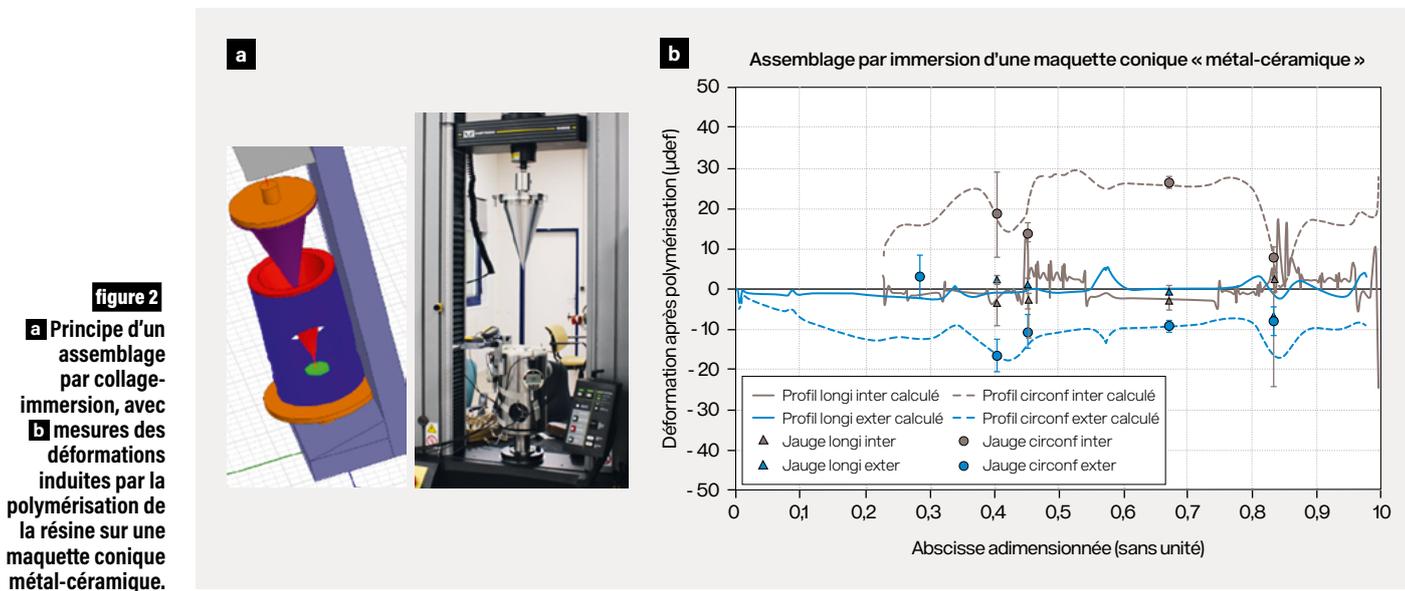


figure 2
a Principe d'un assemblage par collage-immersion, avec **b** mesures des déformations induites par la polymérisation de la résine sur une maquette conique métal-céramique.

centaines de microns (**figure 2a**). La rigidification et le retrait volumique de la résine provoquent alors une augmentation de la force relevée par la machine après six à huit heures d'essai et la déformation des deux pièces assemblées. Ainsi, les valeurs inférieures à $\pm 30 \mu\text{def}$ mesurées à différentes altitudes d'une maquette métal-céramique ont été comparées avec succès aux profils complets obtenus par un calcul 2D axisymétrique avec le code à éléments finis Abaqus (**figure 2b**) : les effets mécaniques associés à la polymérisation de la résine époxyde au-delà du « temps de gel » ont été parfaitement restitués par la loi de comportement anisotrope développée en collaboration avec

l'Institut de recherche en génie civil & mécanique (GeM) de l'université de Nantes **2**.

D'autres étapes de réalisation de couches métalliques, céramiques et polymères ont fait l'objet de mesures de déformation ou de température pour maîtriser les sollicitations induites par les procédés d'assemblage mécanique, d'usinage, d'enduction ou de projection sur des maquettes à l'échelle 1 mises en œuvre au Ripault. La simulation numérique préalable d'une étape de fabrication, comme un montage-démontage d'un outillage de manutention, peut notamment permettre d'optimiser la position des jauges de déformation dans une zone soumise à un fort gradient.

RÉFÉRENCES

1 F. LEVEBVRE, E. WANIESWSKI, « Les contraintes résiduelles, comment les évaluer ? », *Conférence introductive de l'association de traitement thermique et de traitement de surface (A3TS)*, Safran, Paris-Saclay, 2 et 3 février 2017. **2** G. HUCHET, E. HERVE, O. PHILIPPE, B. ARNAUD, E. PONS, R. ESTEVEZ, « Détermination des contraintes résiduelles générées au sein de revêtements métalliques projetés plasma », *5^e conférence internationale A3TS*, Pau, 7 et 8 décembre 2016. **3** M. GIRARD, M. PÉRON, A. UGUEN, P. CASARI, F. JACQUEMIN, « A simple characterization methodology for the identification of the visco-elastic behavior of thermoset adhesives during cure », *Applied Adhesion Science*, **8**, 2 (2020).

Développement d'un moyen de cartographie de matériaux d'épaisseur micrométrique



O. Raphaël
V. Schillinger*
P. Tanguy*
M. Renard*
K. Di Zazzo*
J. Marlien*

CEA - DAM,
centre de Valduc

* en formation
par alternance

La montée en puissance du Laser Mégajoule impose une connaissance toujours plus précise des caractéristiques des cibles expérimentées. En particulier, les expériences dites d'équations d'état, notées EOS (**figure 1**), visant à étudier le comportement de la matière à haute température et à haute pression, nécessitent la maîtrise de l'épaisseur des échantillons d'étude dans des zones localisées de moins de 1 mm². Pour ce faire, le CEA - DAM a développé un moyen de caractérisation spécifique permettant la cartographie d'épaisseur au plus près de la zone expérimentée avec une résolution de quelques centaines de nanomètres.

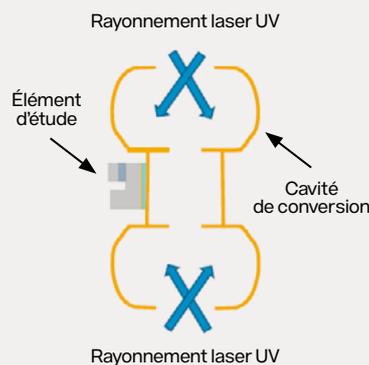
La conception, le développement et la fabrication de la plupart des cibles expérimentées par le CEA - DAM sur les lasers de puissance tels que le Laser Mégajoule sont réalisés au centre de Valduc. La caractérisation complète des cibles permet de valider leur conformité dimensionnelle vis-à-vis du cahier des charges de l'expérience. De plus, ces informations servent de données d'entrée aux simulations numériques chargées d'interpréter et d'analyser les phénomènes expérimentés.

Compte tenu des dimensions des échantillons et des précisions recherchées, les moyens de mesure de l'épaisseur couramment utilisés dans les laboratoires de métrologie se révèlent inadéquats aux besoins des expériences laser de par leur capacité limitée : mesures ponctuelles sur contre-forme de découpe, sur pièces sacrificielles, etc. Afin d'étudier l'homogénéité d'épaisseur des matériaux dans des zones spécifiques, un moyen de caractérisation directe et sans contact des éléments de cible est développé à Valduc. Cet instrument, nommé EMMiE (Équipement de Mesure de Micro Épaisseur), met en œuvre deux sondes confocales chromatiques (**figure 2**), disposées en vis-à-vis, de sorte à détecter simultanément les surfaces inférieure et supérieure du matériau. L'épaisseur est alors évaluée relativement à une cale

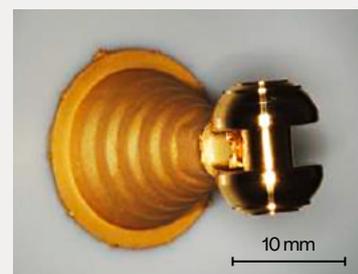
figure 1

Cible EOS se compose de l'échantillon d'étude et d'une cavité de conversion. Réalisée en or, cette dernière assure la transformation du rayonnement laser en rayonnement X et le transfert de celui-ci vers l'échantillon d'étude. Cet échantillon se compose de plusieurs couches superposées de matériaux ayant chacune une fonctionnalité distincte. Par exemple, la première couche rencontrée par le rayonnement X permet la conversion de celui-ci en un choc mécanique de plusieurs centaines de mégabars.

Concept d'une cible EOS



Photographie d'une cible EOS



étalon d'épaisseur connue. Grâce à la motorisation du support échantillon, cet instrument permet de réaliser des cartographies d'épaisseur indépendantes de la courbure des échantillons de façon non destructive, avec une résolution submicrométrique.

La validation métrologique de cet instrument passe par une évaluation des incertitudes de mesure s'appuyant sur l'étude des diverses sources d'erreur : défauts d'alignement et de colinéarité des sondes, défauts d'inclinaison des échantillons, etc.

Le défaut d'alignement des sondes est la principale source d'erreur. En effet, aux échelles concernées, les échantillons ne sont jamais parfaitement plans et horizontaux. Ainsi, tout défaut d'alignement conduit à la mesure d'une épaisseur apparente incluant le défaut de forme de l'échantillon. L'intégration d'une procédure d'alignement des sondes permet un ajustement de l'alignement avec une précision de $0,2 \mu\text{m}$, soit une erreur maximale sur l'épaisseur de 18 nm .

Le défaut de perpendicularité des sondes par rapport au plan moyen de l'échantillon est également une source d'erreur potentielle. Néanmoins, pour une inclinaison maximale de 5° garantie par construction instrumentale, l'erreur de mesure est estimée inférieure à $0,1\%$ de l'épaisseur. L'incertitude de mesure est calculée de façon indépendante en tout point d'une cartographie à partir des diverses sources d'erreur, de la précision des sondes, de la répétabilité des mesures et des incertitudes des étalons. En pratique, pour des mesures d'épaisseur de quelques dizaines de micromètres, l'incertitude de mesure est de l'ordre de la centaine de nanomètres.

Initialement développé pour la caractérisation d'échantillons opaques, cet instrument a ensuite été adapté à l'étude des matériaux transparents pour laquelle une procédure spécifique a dû être implémentée. À titre d'exemple, la **figure 3** présente la cartographie d'épaisseur d'un échantillon de quartz

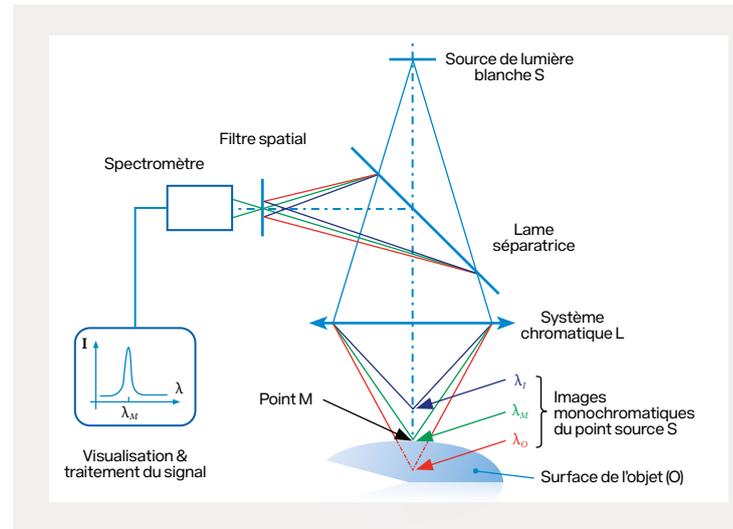


figure 2

Fonctionnement d'une sonde confocale chromatique. De fourniture commerciale, ce type de sonde permet le positionnement précis des faces de l'échantillon dans un référentiel donné. Son principe de fonctionnement repose sur la focalisation d'une source de lumière blanche en un continuum de points focaux monochromatiques. Lorsque l'échantillon pénètre cette plage de mesure, il réfléchit préférentiellement la couleur focalisée à sa surface. Un filtre spatial et un spectromètre viennent ensuite identifier la longueur d'onde de cette couleur et ainsi calculer la position de cette surface dans la plage de mesure.

gravé de deux sillons. La microscopie interférométrique permet de mesurer la profondeur de ces sillons à $(3,14 \pm 0,04) \mu\text{m}$ et $(11,28 \pm 0,04) \mu\text{m}$. Le parfait accord entre les deux ensembles de mesures permet d'apprécier la justesse de ce nouvel instrument.

Ces développements ont été menés en collaboration avec des étudiants en formation par alternance et se poursuivent avec l'extension du domaine d'application aux échantillons multicouches. Du fait de la grande diversité des échantillons d'étude, ce mode de caractérisation spécifique doit faire intervenir, en plus des modes précédents, l'indice optique des matériaux transparents.

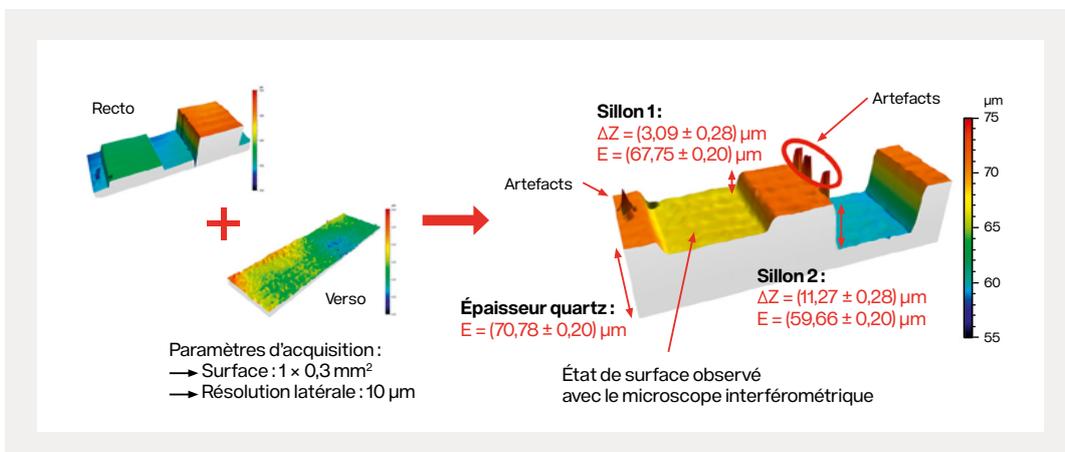


figure 3

Cartographie d'un échantillon de quartz gravé. Grâce à la mise en mouvement de l'échantillon, chaque sonde confocale chromatique fournit la topographie d'une face de l'échantillon. La connaissance précise de la distance séparant les deux sondes permet l'obtention d'une cartographie d'épaisseur par combinaison des deux topographies.

RÉFÉRENCES

1 O. RAPHAEL, P. TANGUY, L. REVERDY, M. THÉOBALD, « Membrane's thickness characterization using two confocal probes », Target Fusion Meeting, poster (2019).

Systeme de métrologie tridimensionnel des cibles du Laser Mégajoule



R. du Jeu
B. Fourton
M. Martin
T. Caillaud
CEA - DAM,
centre du Cesta

Avec le développement et la montée en puissance progressive du Laser Mégajoule, les expériences gagnent en complexité avec les architectures des cibles utilisées. La tolérance spatiale allouée à la métrologie de ces cibles est aussi réduite. Dans ce contexte, l'équipe métrologie a fait l'acquisition d'un nouveau système de métrologie 3D sans contact, basé sur une technologie dite de variation focale, permettant d'atteindre la justesse requise pour les besoins présents et futurs de positionnement des cibles dans l'espace de la chambre d'expériences **1**.

Lors de la mise en œuvre des expériences réalisées au Laser Mégajoule (LMJ), les nombreux faisceaux laser sont focalisés sur une structure complexe faite sur mesure, souvent constituée d'une cavité et de divers éléments annexes, communément appelée cible. La conception, l'assemblage et la métrologie de ces cibles sont une mission d'un laboratoire du centre CEA - DAM du Cesta. L'architecture des cibles est directement dépendante des besoins des expériences et doit prendre en compte le ou les phénomène(s) physique(s) recherché(s), les angles d'observation des différents diagnostics plasma et le positionnement de la cible dans la chambre d'expériences. Ce positionnement est garanti par l'ajout d'éléments géométriquement remarquables (EGR) utilisés par les systèmes de positionnement du LMJ. L'augmentation du nombre de chaînes laser et de diagnostics plasma en service au LMJ offre un panel de possibilités de plus en plus large aux maîtres d'œuvre des expériences. Cela se traduit sur les cibles par une diversification et une complexification des architectures. La **figure 1** présente quatre architectures de cibles fabriquées pour des expériences en 2022.

L'objectif de la métrologie est de valider la conformité des cibles et de fournir les coordonnées de positionnement à l'installation LMJ. Comme l'illustrent bien les exemples de la **figure 1**, les cibles possèdent des éléments de taille et de matériaux divers (avec des densités très différentes), allant d'un fil en métal de 25 μm de diamètre à des cônes en plastique de plusieurs millimètres ou plus gros encore. Le défi est donc de pouvoir réaliser les mesures 3D

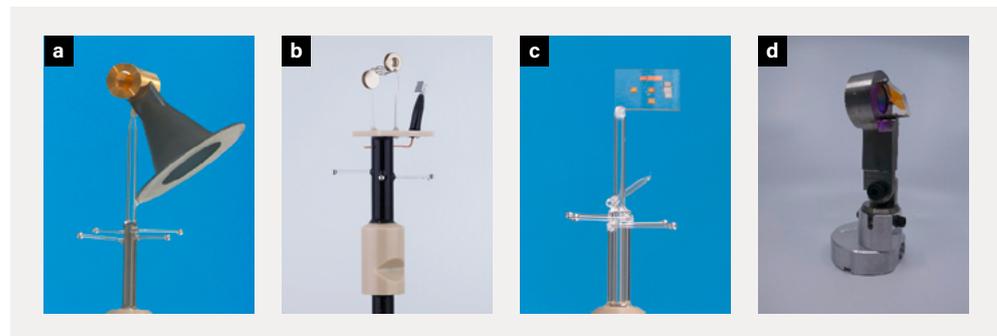


figure 1

Photographies de cibles d'expérience, constituées de **a** une cavité avec un cône anti-lumière parasite, **b** quatre spires métalliques de 50 μm d'épaisseur autour d'une feuille plastique, **c** un alignement sur fil de 25 μm - plaque radiographique, **d** une enclume diamant et un miroir (cible environ 50 fois plus lourde que les autres).

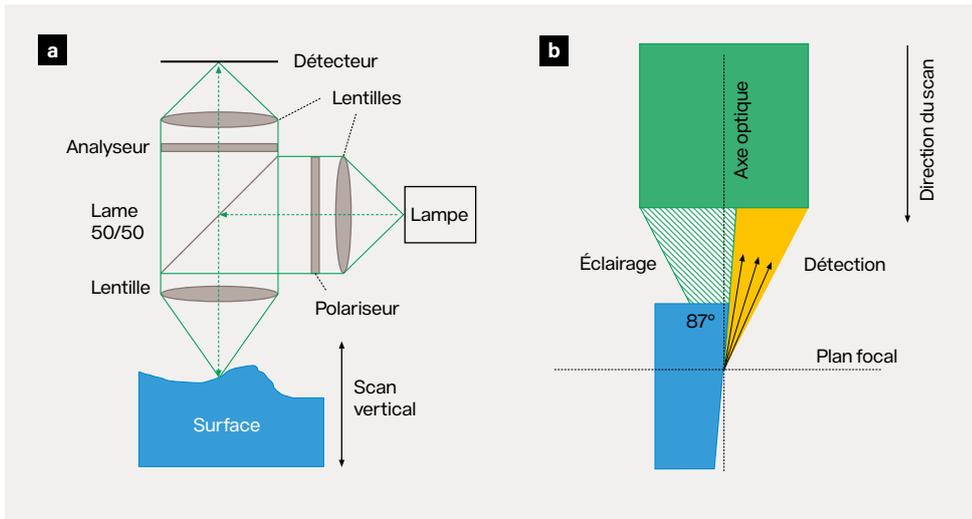


figure 2
Schémas de principe de la variation focale **a** telle qu'exploitée avec la μ CMM, **b** pour la mesure d'un plan d'un angle de 87°.

sans contact de ces divers éléments très fragiles. Jusqu'à présent, le laboratoire était équipé d'une machine de métrologie développée par le CEA, adaptée à des cibles plus simples. La montée en puissance du LMJ requiert aussi une précision accrue des métrologies, notamment des coordonnées de positionnement fournies suite à la métrologie. La tolérance allouée à la métrologie des cibles a évolué de $\pm 30 \mu\text{m rms}$ à $\pm 10 \mu\text{m rms}$, et 1 mrad rms. C'est dans ce contexte que le laboratoire a décidé de s'équiper d'une nouvelle machine de métrologie issue du commerce grâce aux progrès accomplis par l'industrie. Ainsi, suite à un appel d'offres et une série d'essais chez des industriels, la solution choisie est une machine de métrologie 3D sans contact μ CMM de l'entreprise Brucker Alicona. Basée sur une technologie dite de variation focale, la μ CMM est capable d'effectuer des mesures de rugosité et de forme sur tout type de matériaux. La variation focale est une méthode qui permet de mesurer la topographie de surface en utilisant des optiques avec une profondeur de champ limitée et un balayage du système selon l'axe optique. Pendant la mesure, des images sont enregistrées avec un pas variant de 5 nm à 5 μm . Une partie de la lumière est réfléchiée par la surface et renvoyée vers un capteur numérique haute résolution. En déplaçant le bloc optique (capteur inclus), la distance à la surface varie et, pour chaque position sur la surface, les informations de focalisation sont enregistrées puis interprétées pour reconstruire la surface en 3D. En plus d'une illumination coaxiale, la variation focale permet l'emploi de sources lumineuses diverses (anneau externe, lumière polarisée, lumière transmise) et également la prise de mesure avec des pentes allant jusqu'à 87°. La **figure 2** illustre le fonctionnement de la variation focale de la μ CMM.

Ainsi, jusqu'à 3 millions de points de mesure peuvent être obtenus en une seule acquisition en seulement quelques secondes. Associée à un logiciel de

reconstruction 3D, la μ CMM est capable de comparer une CAO théorique avec la mesure (**figure 3**), nous permettant de valider ou non la conformité des cibles assemblées au laboratoire. Les cibles d'une campagne d'expériences étant produites en petite série, la μ CMM offre aussi la possibilité d'établir un programme d'acquisition et de traitement des mesures afin d'automatiser le procédé à partir d'une seule cible. C'est un élément capital pour le laboratoire puisque avec la montée en puissance du LMJ, le nombre d'expériences et donc le nombre de cibles tendent à augmenter. Grâce à ce système de haute performance, le laboratoire est équipé pour répondre aux exigences de métrologie des cibles pour les campagnes d'expériences à venir au LMJ. En effet, les mesures de qualification réalisées en interne et chez le fournisseur ont montré une répétabilité à 2 μm et une justesse de 5 μm ($\hat{\alpha} k = 2$), outillages de préhension des cibles inclus.

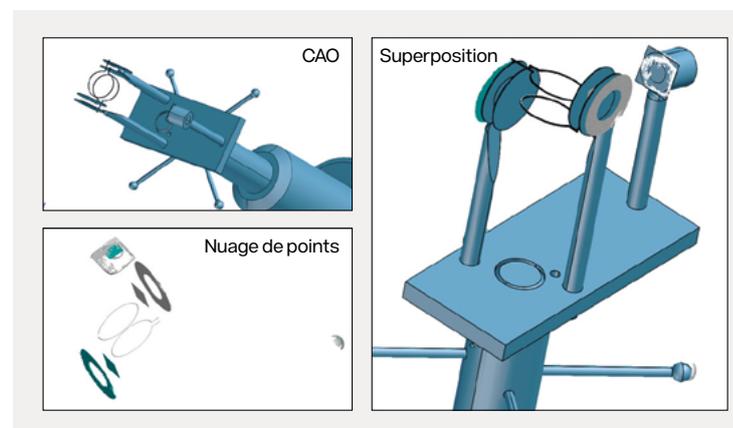


figure 3
Superposition de la CAO (bleu) avec les mesures obtenues (vert et gris).

RÉFÉRENCES

1 R. DANZL, F. HELMLI, S. SCHERER, « Focus variation – a new technology for high resolution optical 3D surface metrology », *The 10th International Conference of the Slovenian Society for non-Destructive Testing*, 1-3 sept. 2009, Ljubljana, Slovénie, 11, p. 8457 (2009).

Vélocimètre laser multiplexé en longueurs d'onde sans diaphonie optique



Y. Barbarin
G. Le Blanc
M. Roudot
J. Luc
CEA - DAM,
centre de Gramat

Le CEA - DAM réalise de nombreux essais de physique des matériaux instrumentés avec des vélocimètres laser basés sur le principe de l'effet Doppler. Le système fibré multipoint développé permet de réaliser seize mesures ultrarapides de vélocimétrie sur des visées submillimétriques sans problème de diaphonie entre les voies de mesure. L'architecture est basée sur le multiplexage en longueurs d'onde avec un espacement fréquentiel entre les voies dix fois supérieur aux fréquences Doppler à mesurer. Des mesures comparatives sont présentées pour mettre en avant l'intérêt de cette approche ainsi qu'une analyse des incertitudes de mesure.

La vélocimétrie hétérodyne permet de mesurer les vitesses de déplacement d'un matériau ou d'un front de choc. Les récents développements réalisés ont eu pour but de multiplier le nombre de points de visée sur les matériaux d'étude (jusqu'à plus d'une centaine), mais sans forcément prendre en compte la problématique de diaphonie optique entre les voies de mesure. Ce phénomène est clairement visible lorsque les points visés sont espacés d'un millimètre ou moins. La solution proposée **1** consiste à utiliser une longueur d'onde différente pour chaque point visé. En effet, si la fréquence Doppler maximale à mesurer, typiquement de 13 GHz pour une vitesse de 10 km/s à la longueur d'onde laser de 1 550 nm, est bien inférieure à la différence de fréquence entre les points de mesure, plus aucune diaphonie optique ne sera engendrée entre les voies. Un tel système fibré a été réalisé au centre CEA - DAM de Gramat avec seize voies de mesure et validé sur des expériences de physique des matériaux mettant en œuvre un générateur de rampe de pression électrique **2**.

Le système proposé est illustré sur la **figure 1a**. Il comporte seize lasers, avec seize longueurs d'onde différentes espacées de 100 GHz de la grille ITU (*International Telecommunication Union*). Les seize lasers sont multiplexés dans l'interféromètre par un AWG (*Arrayed Waveguide*

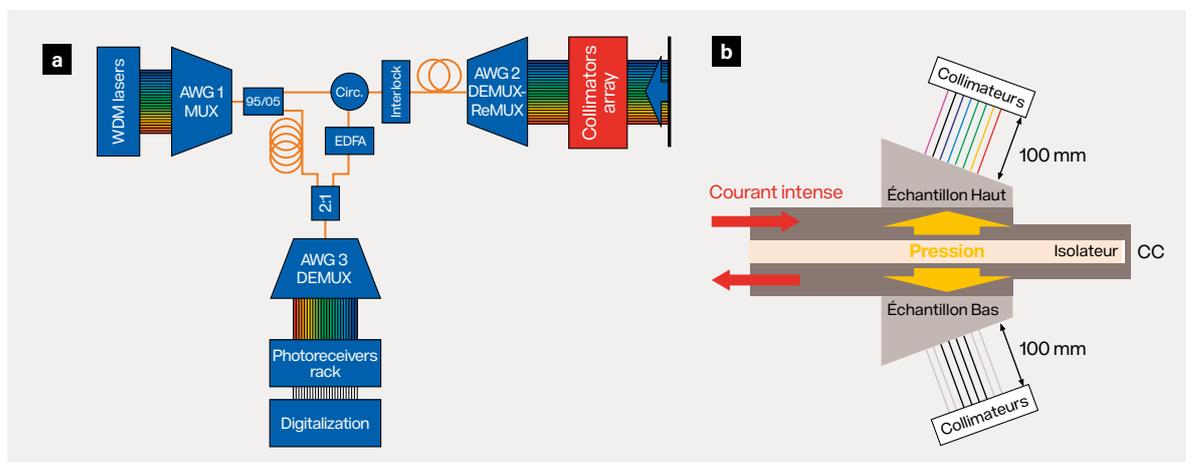


figure 1

a Schéma du vélocimètre fibré multilongueur d'onde (seize lasers sont multiplexés à l'entrée de l'interféromètre et démultiplexés avant les visées et la numérisation). **b** Expérience symétrique d'une rampe de compression pour mettre en évidence la diaphonie optique en comparant le système multilongueur d'onde (en haut) et un système classique monolongueur d'onde (en bas).

Grating). Une seule fibre de départ amène les seize lasers vers le second AWG (démultiplexeur) et les visées. Les signaux de retour sont recouplés dans les collimateurs et redirigés par le circulateur vers un amplificateur fibré (dopé à l'erbium) avant de les faire interférer avec les seize faisceaux de référence dans le coupleur optique 2:1. L'amplificateur compense les pertes optiques aller et retour du second AWG. Le troisième AWG démultiplexe ensuite les seize faisceaux d'interférence pour que chaque voie puisse être détectée par un photorécepteur dédié de 2 GHz de bande passante. Les visées sur le matériau à étudier sont typiquement effectuées par des matrices de huit collimateurs espacés de 1 mm (figure 1b). Les mesures réalisées ont montré que la diaphonie optique est de l'ordre de -10 dB sur une cible en aluminium légèrement diffusante à une distance de 50 mm des collimateurs.

Lors d'une première expérience de démonstration, huit faisceaux multilongueur d'onde et quatre faisceaux monolongueur d'onde ont été rétrodiffusés sur deux cibles identiques. La forme en trapèze des cibles a fourni des pics de vitesse décalés dans le temps et décroissants avec la hauteur. Une comparaison des valeurs de ces pics avec la simulation numérique (figure 2) a été réalisée. Les résultats mettent en défaut les vélocimètres monolongueur d'onde alors que le système multilongueur d'onde a, lui, parfaitement mesuré les huit pics de vitesse sans diaphonie optique.

Une deuxième expérience a permis d'analyser les incertitudes de mesure sur un même point avec seize longueurs d'onde. Cela est possible en retirant temporairement le second AWG sur le montage expérimental. En soustrayant une vitesse moyenne considérée de référence à toutes les voies de mesure, la variabilité maximale observée sur les mesures de vitesse était de $\pm 1,3$ m/s (figure 3) et a même pu atteindre $\pm 0,1$ m/s en utilisant

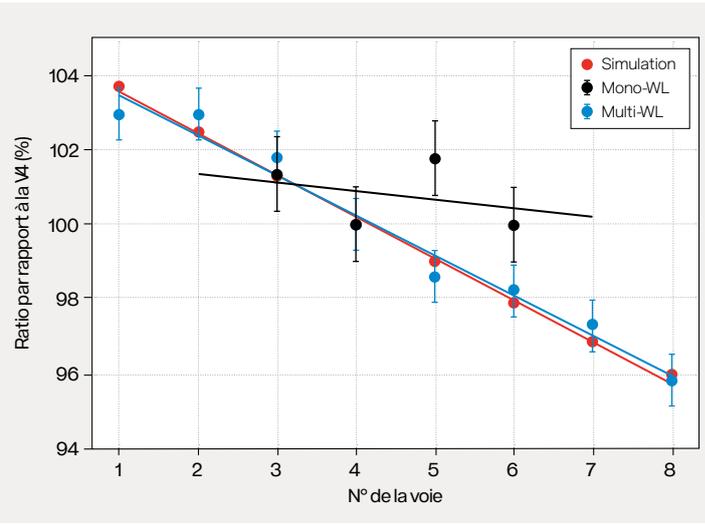


figure 2
 Comparaison des pics de vitesses obtenus (par rapport à la voie 4) avec huit faisceaux multilongueur d'onde (en bleu) et quatre faisceaux monolongueur d'onde (en noir).

des numériseurs de dernière génération possédant une meilleure résolution.

Le système de vélocimétrie hétérodyne à seize longueurs d'onde a démontré sa robustesse face à la problématique de diaphonie optique dans une expérience dédiée. Une étude de la variabilité des mesures de vitesse a été menée et a montré que des valeurs proches de la théorie peuvent être obtenues avec des numériseurs de dernière génération. Pour être utilisé en routine, le prototype actuel doit être modifié afin d'optimiser les puissances laser avec des amplificateurs optiques. Il nécessite également l'ajout d'une fréquence pivot commune pour mieux traiter les signaux à basse vitesse. Enfin, des études complémentaires sur l'estimation des incertitudes de mesure de vitesse sont prévues.

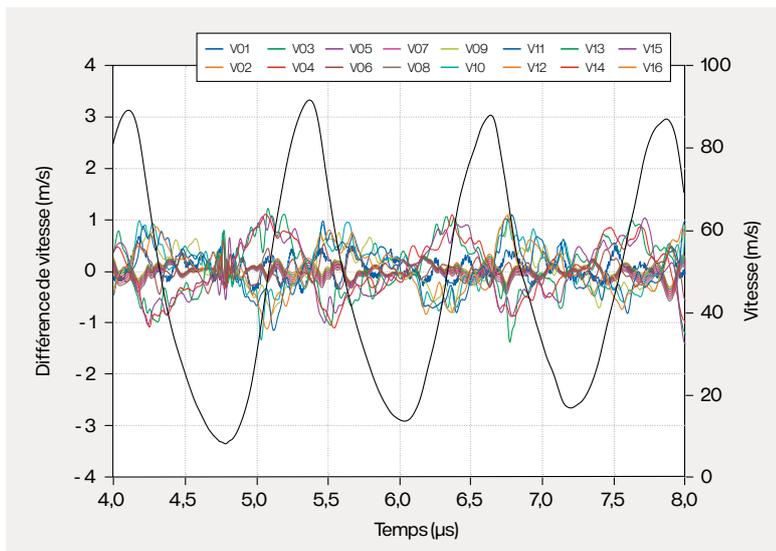


figure 3
 Variabilité des mesures de vitesse (en m/s) sur les seize voies de mesure du système multilongueur d'onde pour la mesure d'un profil de vitesse sinusoïdal variant entre 8 et 90 m/s (courbe noire).

RÉFÉRENCES

1 Y. BARBARIN, G. LE BLANC, T. D'ALMEIDA, M. HAMROUNI, M. ROUDOT, J. LUC, « Multi-wavelength crosstalk-free photonic Doppler velocimetry », *Rev. Sci. Instrum.*, **91**, 123105 (2020). 2 Y. BARBARIN, G. LE BLANC, M. ROUDOT, J. LUC, « Multi-wavelength crosstalk-free velocimetry demonstration and uncertainties », *Rev. Sci. Instrum.*, **93**, 083904 (2022).

Mesure de vitesses par vélocimétrie homodyne en triature



J.-M. Chevalier

C. Lacoste

CEA - DAM,
centre du Cesta

S. Éveillard

M. Mikart

CEA - DAM,
centre DAM Île-de-France

B. Jodar

CEA - DAM,
centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay,
CEA, Laboratoire matière en
conditions extrêmes (LMCE),
Bruyères-le-Châtel

Les mesures d'évolution temporelle des vitesses ou des déplacements d'un mobile sont des diagnostics essentiels pour les études de dynamique rapide. Elles font souvent appel à des méthodes d'interférométrie Doppler laser, la plus couramment utilisée actuellement au CEA - DAM étant appelée vélocimétrie hétérodyne ou homodyne. L'analyse associée se fait par transformée de Fourier glissante qui peut induire des impossibilités ou incertitudes notables dans le cas des faibles vitesses à grande dynamique temporelle. La vélocimétrie hétérodyne ou homodyne (VH) dite en triature permet de résoudre ces difficultés. Après avoir présenté son principe, nous proposons un exemple illustrant les capacités associées.

La vélocimétrie hétérodyne **1** est basée sur le battement de fréquence obtenu par le mélange sur un photodétecteur de deux ondes laser de haute pureté spectrale. La première a été collectée après réflexion sur un mobile. Elle a donc subi un pseudo-changement de fréquence Δv par effet Doppler [$v(t) = v_0 + \Delta v(t)$]. La seconde est issue d'un second laser de fréquence $v_0 + \delta v$. Dans le cas homodyne, la seconde onde laser est issue d'un prélèvement (2 %) de la première onde en amont du mobile. L'évolution temporelle des battements de fréquence est enregistrée sur un oscilloscope de grande dynamique temporelle et de bande passante supérieure au Δv_{Max} attendu. L'évolution temporelle de la vitesse est déduite par transformée de Fourier glissante sur un intervalle Δt . Les résolutions en temps et en vitesse associées sont d'autant plus grandes que la fenêtre Δt est faible (5 à 10 ns), donc que le rapport signal à bruit est élevé. Néanmoins, pour les très faibles vitesses, il est indispensable d'augmenter significativement la valeur de Δt . De plus, l'extraction d'un signal de très faible vitesse est parfois rendue difficile, voire impossible, car sur le spectrogramme associé à la transformée de Fourier glissante, le signal utile est presque confondu avec le signal dit pivot, correspondant au résidu de l'onde laser sonde qui n'a pas vu le mobile (réflexion aux interfaces).

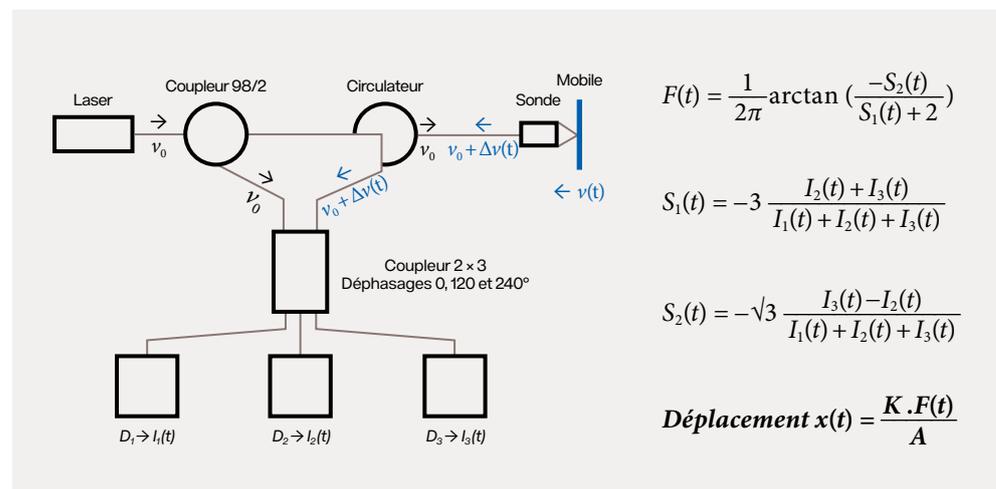
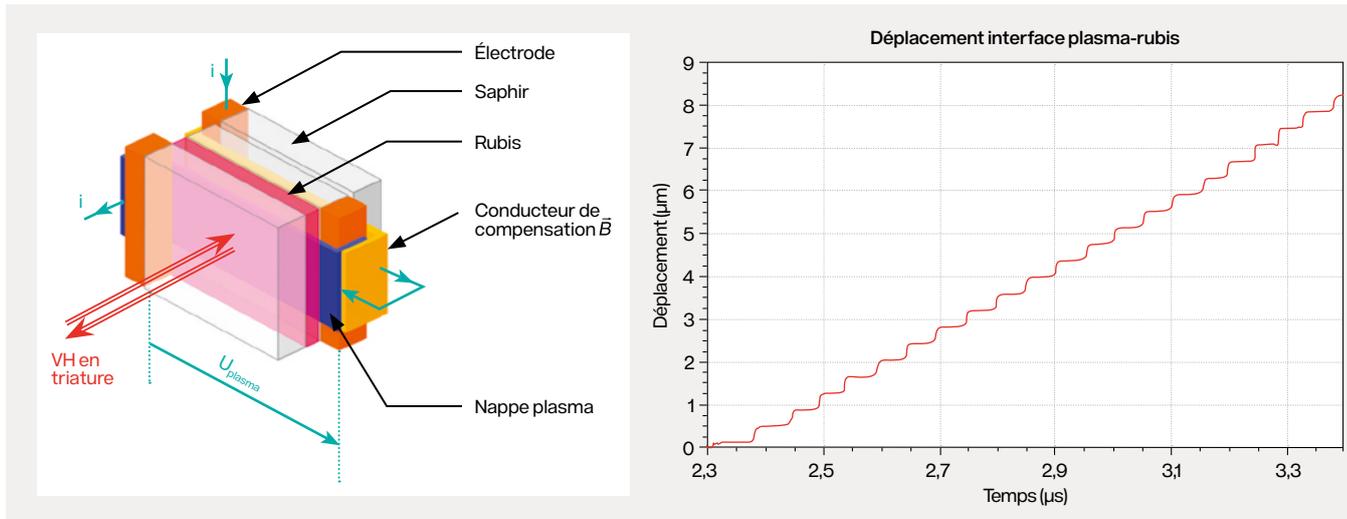


figure 1

Schéma de principe du diagnostic VH en triature: F facteur de frange, K saut de frange ($\lambda/2$) et A correction d'indice sous choc du matériau considéré.

**figure 2**

Déplacement mesuré par VH triature de l'interface plasma-rubis : cas d'une décharge de 30 kV dans une feuille d'aluminium de 15 µm.

La méthode dite VH en triature [2](#) permet de pallier ces limitations. Son principe expérimental est présenté sur la [figure 1](#). Cette technique, basée sur la vélocimétrie homodyne, permet d'enregistrer trois battements de fréquence sur trois photodétecteurs distincts, *via* un coupleur à deux entrées et trois sorties, qui déphasent les trois signaux de respectivement 0, 120 et 240°. Les évolutions temporelles de la vitesse $v(t)$ ou du déplacement $x(t)$ peuvent être déduites de ces signaux, à l'aide de trois méthodes. La première, dite en triature, permet de déduire $x(t)$ à partir des formules analytiques présentées sur la [figure 1](#). Cette méthode permet de s'affranchir des limitations de la transformée de Fourier glissante décrite ci-dessus. La deuxième consiste à faire une transformée de Fourier glissante sur un des trois signaux acquis afin d'en déduire $v(t)$. La dernière est basée sur le traitement en Lissajous de deux des trois signaux acquis qui sont alors déphasés de 120°. La vitesse $v(t)$ est alors obtenue après normalisation et circularisation de l'ellipse associée. C'est la première méthode qui est recommandée, car elle ne fait appel à aucune opération mathématique particulière. Néanmoins, le fait de pouvoir déduire la grandeur recherchée par trois méthodes distinctes est un avantage supplémentaire, notamment pour la comparaison et la validation des résultats obtenus.

Les potentialités de ce diagnostic peuvent être illustrées par un résultat obtenu lors d'une expérimentation réalisée avec l'enceinte à plasma pulsé du centre DAM Île-de-France. Ce moyen est utilisé pour recueillir des données physiques d'un matériau, comme

une équation d'état ou un coefficient de transport, soumis à une décharge électrique de type haute puissance pulsée. Les diagnostics associés sont la mesure de pression induite, des conditions initiales *via* des mesures de tension et de courant, et de la masse volumique de la nappe de plasma *via* la mesure de déplacement de la nappe de plasma ainsi créée. La [figure 2](#) décrit la configuration expérimentale utilisée et le résultat obtenu avec la VH en triature. La courbe de déplacement de la nappe de plasma créée met bien en évidence certaines des capacités de ce diagnostic. En effet, il permet de rendre compte, avec une résolution temporelle inférieure à la nanoseconde, de l'évolution temporelle du très faible déplacement de cette nappe de plasma.

Des résultats très intéressants ont également été enregistrés sur des essais dynamiques avec des caractéristiques en temps ou amplitude très différentes, tels que les chocs de plaque avec lanceur, les mesures d'impulsion transmise sous dépôt laser pour des applications de propulsion spatiale ou les mesures dites de pesée par feuille d'Asay. Dans ce dernier cas, l'objectif est de qualifier les vitesses et les tailles d'un nuage de particules impactant une feuille fine. L'application du diagnostic VH en triature a notamment permis de rendre compte des premiers instants qui correspondent généralement à des particules très véloces mais très petites et à l'état liquide. La faible impulsion ainsi transmise à la feuille n'était pas toujours accessible avec la technique en VH pure. Ce diagnostic nouveau est encore en phase de perfectionnement et d'étude.

RÉFÉRENCES

- [1](#) P. MERCIER, J. BÉNIER, A. AZZOLINA, J.-M. LAGRANGE, D. PARTOUCHE, « Photonic doppler velocimetry in shock physics experiments », *J. Phys. IV*, **134**, p. 805-812 (2006). [2](#) D. H. DOLAN, S. C. JONES, « Push-pull analysis of photonic Doppler velocimetry measurements », *Rev. Sci. Instrum.*, **78**, 076102 (2007).

Développement d'un système de vélocimétrie hétérodyne multiplexée



J. Bénier
CEA – DAM,
centre DAM Île-de-France

V. Guyot
CEA – DAM,
centre de Valduc

La mesure de vitesse est essentielle pour la connaissance des paramètres physiques à étudier dans les expériences de détonique au CEA – DAM. Au début des années 2000, celui-ci a développé un système de vélocimétrie hétérodyne pour mesurer des vitesses supérieures à 5 km/s **1**. Le nombre croissant de mesures vélocimétriques (supérieur à 100 par expérience) qui est requis dans les expériences a conduit le CEA – DAM à développer un nouvel équipement. Dans un premier temps, le principe de la vélocimétrie hétérodyne est rappelé puis nous développons la nouvelle architecture technique que nous avons retenue. Enfin, nous donnons les principales performances du système.

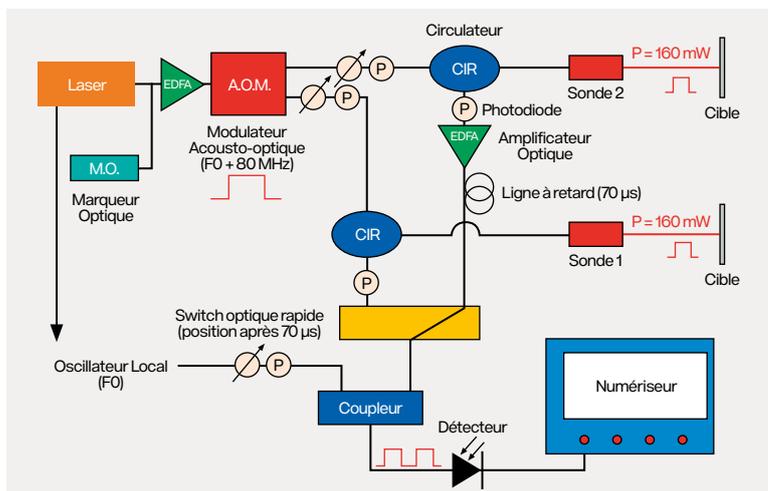
Le principe de la vélocimétrie hétérodyne (VH) repose sur un interféromètre du type Michelson fibré. Le faisceau de référence est alimenté par un laser, nommé oscillateur local sur la **figure 1**, et le faisceau de mesure est décalé en fréquence grâce à un modulateur acousto-optique (**figure 1**). Lorsque la cible se déplace, la fréquence des battements entre les deux faisceaux (mesure issue du signal réfléchi et référence) est modifiée et la vitesse de l'objet (V) est déduite de la fréquence des interférences produites (f) par la relation :

$$V = \lambda/2 \times f$$

Dès 2009, le CEA – DAM a fait industrialiser le système pour équiper chaque baie VH de quatre voies de mesure **2**. L'augmentation des points de mesure nécessitait de revoir la conception des baies et de proposer de nouvelles solutions. En 2016, nous avons développé un prototype permettant de tester tout d'abord le multiplexage des signaux en fréquence et en temps, puis uniquement en temps **3**. À la suite de la réalisation de plusieurs essais, la version temporelle uniquement (**figure 1**) a été retenue compte tenu de la simplicité d'analyse des spectrogrammes et de l'absence de perturbations entre les signaux.

Cette configuration consiste à décaler temporellement huit signaux à l'aide de plusieurs dizaines de kilomètres de fibre optique (la lumière parcourt 1 km de fibre optique en 5 µs). Par conséquent, nous avons conçu un système avec sept lignes à retard et des amplificateurs pour compenser les pertes optiques (environ 0,2 dB/km), permettant ainsi d'acquérir sur une voie unique de numériseur

figure 1
Principe optique de la VH multiplexée temporellement sur deux voies de mesure. Le signal délivré par la sonde 1 n'est pas retardé. Le signal délivré par la sonde 2 est amplifié puis retardé de 70 µs avec 14 km de fibres. Le numériseur enregistre le signal de la sonde 1, puis, après un retard de 70 µs, le switch optique bascule et le numériseur enregistre le signal de la sonde 2.



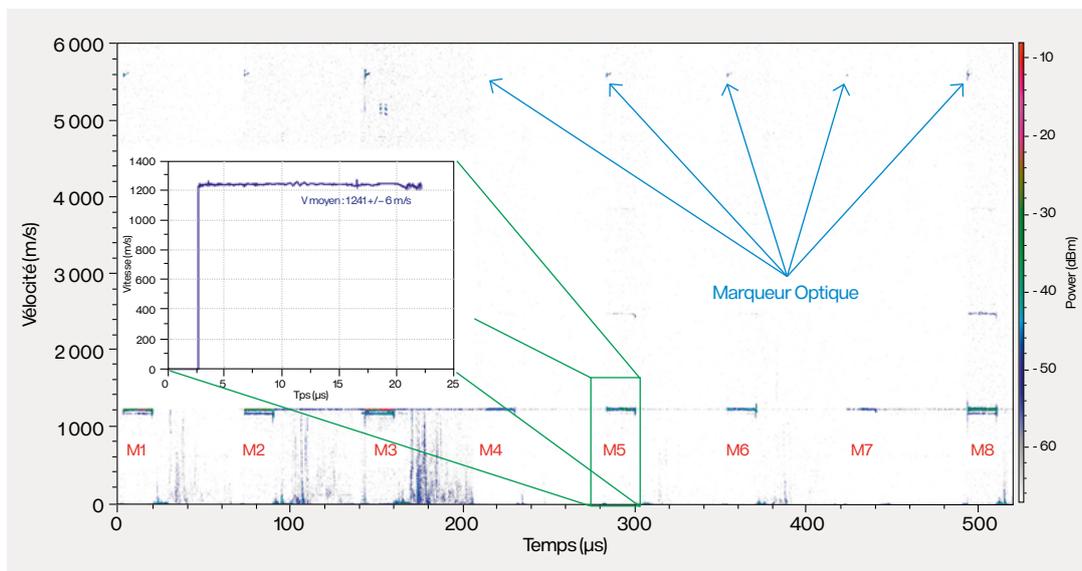


figure 2
Spectrogramme (représentation temps/fréquences) de 8 signaux VH multiplexés temporellement. Chaque signature (M1 à M8) est indépendante. Le marquage optique est visible en haut du spectrogramme et ne perturbe pas le signal dynamique. La fenêtre montre l'un des signaux analysés et recalés en temps.

huit signaux décalés chacun temporellement d'environ $70 \mu\text{s}$ (**figure 1**). L'utilisation d'une impulsion laser, de durée comprise entre 5 et $70 \mu\text{s}$, permet de minimiser le dépôt d'énergie sur la cible (moins de $5 \mu\text{J}$) et l'absence de recouvrement des voies est assurée par des switches optiques rapides.

La mise en œuvre d'une photodiode et d'atténuateurs permet de maîtriser plus facilement la radiométrie et aide les opérateurs à régler le système. Ainsi, il est possible, après un étalonnage du spectrogramme, de connaître l'évolution radiométrique du signal.

Le multiplexage temporel induit un recalage chronométrique des signaux. En effet, les voies M2 à M8 sont retardées afin d'afficher, sur une même voie de mesure, les huit signaux. Afin d'améliorer la reconstruction chronométrique des signaux (M1 à M8 sur la **figure 2**), un marqueur optique envoie une impulsion synchrone dans chaque voie de mesure, depuis la source jusqu'au détecteur, en passant par la surface à mesurer. Celui-ci délivre une impulsion avec un front de montée inférieur à 1 ns, dont la signature est identifiable sur le spectrogramme sans affecter l'enregistrement dynamique des signaux expérimentaux. Cette référence commune permet de superposer les signaux décalés sur la première voie enregistrée (M1), non retardée optiquement. L'utilisation du marquage des signaux nous permet ainsi d'atteindre une précision de la mesure temporelle inférieure à 5 ns.

La **figure 2** présente un exemple de signature enregistrée lors d'une expérience de validation (choc de plaques sur lanceur).

La baie VH multiplexée est équipée de quatre voies de numérisation, on dispose donc de 32 (4×8) voies de mesure. Le CEA – DAM possède actuellement cinq baies VH multiplexées (**figure 3**), soit une capacité de 160 voies de mesure. Afin de faciliter le réglage des composants optoélectroniques (atténuation, puissance laser, amplificateur, etc.), le système est entièrement pilotable à distance

via Ethernet et un contrôle-commande basé sur un protocole client-serveur. Le logiciel de pilotage permet à la fois de contrôler les systèmes optiques et le numériseur chargés de l'acquisition des signaux (réglages de la baie) et d'enregistrer les mesures réalisées pour chaque essai. Les principales améliorations techniques apportées par ces baies sont la maîtrise de la radiométrie, la faible énergie déposée sur la mesure et la possibilité de contrôler à tout moment les lignes de mesure sans déconnexion.

En conclusion, le développement et l'installation des nouvelles baies de mesure de vélocimétrie hétérodyne multiplexée sur les sites expérimentaux permettent d'augmenter les capacités de mesure des expériences de détonique du programme Simulation du CEA – DAM. En effet, ce nouveau système multiplie par huit la capacité de mesure pour un même encombrement.



figure 3
Cinq baies VH multiplexée (160 voies de mesure). On remarque l'absence de boutons de réglage et la présence des connexions optiques et électriques uniquement. Les baies sont commercialisées sous licence CEA par la société Idil Fibres optiques.

RÉFÉRENCES

- 1 P. MERCIER, J. BÉNIER, A. AZZOLINA, J.-M. LAGRANGE, D. PARTOUCHE, « Photonic doppler velocimetry in shock physics experiments », *J. Phys. IV*, 134, p. 805-812 (2006).
- 2 J. BÉNIER, P. MERCIER, E. DUBREUIL, J. VEAUX, P.-A. FRUGIER, « New heterodyne velocimeter and shock physics », *Proceedings of the 9th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under dynamic loading (Dymat 2009)*, Bruxelles, 7-11 novembre 2009, Vol. 1, p. 289-294 (2009).
- 3 J. BÉNIER, P. MERCIER, V. GUYOT, « CEA Multiplexed PDV », *2018 Photonic Doppler Velocimetry (PDV) Users Workshop*, Santa Fe, Nouveau-Mexique, États-Unis, 16-18 mai 2018, <https://kb.osu.edu/handle/1811/86125>.

Métrologie de chaînes d'acquisition électriques sur le Laser Mégajoule



V. Trauchessec
CEA - DAM,
centre DAM Île-de-France

Le Laser Mégajoule permet de reconstituer les conditions thermodynamiques nécessaires à la fusion nucléaire *via* l'implosion d'une cible sous l'effet d'une impulsion laser de très haute énergie. L'environnement électromagnétique et radiatif généré par les expériences impose de déporter l'instrumentation à l'intérieur de casemates faradisées. Le transport et la numérisation des signaux issus des détecteurs des diagnostics plasma dégradent leur intégrité. Des méthodes de caractérisations métrologiques et de traitements sont donc mises en œuvre afin de corriger numériquement les effets liés aux chaînes d'acquisition électriques des diagnostics plasma.

Les expériences conduites sur le Laser Mégajoule (LMJ) mettent en œuvre des détecteurs de différents types : outre les imageurs, des capteurs de rayonnement ou de particules sont utilisés, photodiodes, phototubes, scintillateurs, etc. Leur rôle est de convertir le flux électromagnétique ou neutronique en un signal électrique directement exploitable par un système d'acquisition. Ce système est composé de plusieurs éléments dont chacun influe sur l'intégrité du signal mesuré. Dans les gammes de fréquences des phénomènes observés, un simple câble coaxial est à considérer comme un composant à part entière qu'il est nécessaire de caractériser précisément.

Les signaux issus des détecteurs doivent parcourir la distance les séparant des systèmes d'acquisition, qui sont situés dans des zones faradisées pour limiter l'effet des radiations issues des expériences. Les signaux sont transmis par des câbles coaxiaux sur des distances de plusieurs dizaines de mètres, liées aux dimensions et aux contraintes de l'installation LMJ. Les câbles utilisés affichent des niveaux de perte très faibles et une large bande passante adaptée aux signaux d'intérêt. Néanmoins, le comportement capacitif des câbles induit un effet de filtrage qui devient non négligeable pour les fréquences supérieures à 1 MHz. De plus, lorsque la fréquence du signal augmente, les charges ont tendance à ne circuler qu'en périphérie du conducteur, c'est l'effet de peau. Ce phénomène diminue la section utile du câble, ce qui augmente sa résistance et les pertes par effet Joule lors de la transmission du signal. Par ailleurs, plusieurs centaines de volts peuvent ainsi être appliquées au capteur, qui délivre un signal du même ordre de grandeur. Des racks d'atténuateurs programmables sont installés en bout de chaîne d'acquisition afin de ne pas endommager les étages d'entrée des numériseurs. L'effet capacitif de la liaison, l'effet de peau et les niveaux d'atténuation appliqués nécessitent des moyens de métrologie spécifiques pour quantifier la dégradation subie par les signaux lors de leur transmission [1,2](#).

Des procédures de métrologie sont mises en œuvre pour caractériser ces liaisons électriques en matière d'atténuation et de déphasage. La caractérisation d'une chaîne d'acquisition, qui comprend typiquement plusieurs dizaines de mètres de câbles coaxiaux, des atténuateurs, des tés de polarisation, différents composants hyperfréquences (diviseurs, transitions, connectiques), et des dispositifs de protection (limiteurs de surtension) nécessitent de déterminer sa réponse impulsionnelle. Pour accéder à cette grandeur d'intérêt, des générateurs d'impulsion sont positionnés en début de chaîne et connectés à la place des détecteurs. Ces générateurs présentent des performances permettant

de sonder la réponse de la chaîne jusqu'à plusieurs gigahertz. En effet, les fronts de montée des signaux de référence utilisés pour la métrologie d'une liaison peuvent descendre à des valeurs de l'ordre de 40 picosecondes, ce qui correspond à une bande passante supérieure à 8 GHz. Une fois la réponse impulsionnelle obtenue, une analyse de Fourier donne accès à la fonction de transfert, dont le module et la phase sont exploités pour corriger les signaux mesurés lors des campagnes d'expériences des effets subis lors de leur transmission jusqu'aux numériseurs (**figure 1**).

Le dernier élément de la chaîne d'acquisition électrique est le numériseur. Si la dégradation du signal due à la numérisation est négligeable par rapport aux effets de la transmission, les caractéristiques des numériseurs doivent également être évaluées précisément par des procédures de métrologie dédiées. Le bruit de phase, associé aux fluctuations temporelles de la période d'échantillonnage, augmente avec la fréquence des signaux à acquérir et devient

prépondérant au-delà de quelques gigahertz. Le bruit de quantification, lié à la pleine échelle du numériseur et au nombre de bits du convertisseur analogique-numérique, ainsi que le bruit thermique limitent la dynamique dans les plus basses fréquences. Ces effets peuvent être estimés par la mesure du nombre de bits effectifs des numériseurs. Leur métrologie vise également à quantifier les erreurs d'offset et de gain, les désadaptations d'impédance, les décalages intervoies, etc. Un module spécifique a été développé par le CEA – DAM (**figure 1a**) pour assurer cette vérification à distance *via* le contrôle-commande des diagnostics. Cet outil, totalement automatisé, permet de mesurer différentes sources d'incertitudes internes aux oscilloscopes, notamment par une mesure de bits effectifs pouvant être mise en œuvre avant chaque tir. Toutes ces mesures sont réalisées périodiquement et permettent d'affiner la précision et la fiabilité des signaux acquis lors des expériences sur le LMJ.

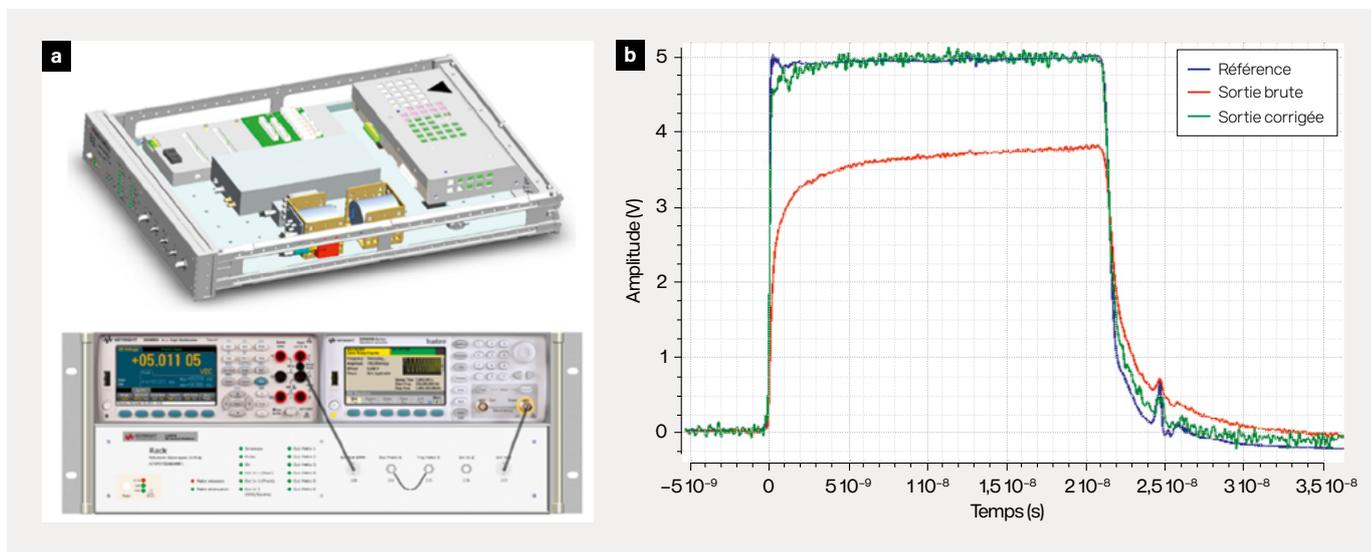


figure 1

a Dispositif de métrologie *in situ* des numériseurs associés aux diagnostics plasma, comprenant un générateur basse fréquence (GBF), un multimètre et un rack permettant d'orienter les signaux vers les différents équipements sous test. **b** Illustration de la correction par déconvolution d'un signal mesuré (rouge) après avoir été transporté et atténué par une liaison typique. Le signal corrigé par l'algorithme (vert) est très proche du signal de référence attendu (bleu).

RÉFÉRENCES

1 V. TRAUCHESSEC, « Metrology of acquisition chains and signal processing of LMJ experiments », ANIMMA 2021, *EPJ Web of Conferences*, **256**, 03001, DOI : 10.1051/epjconf/202125303001 (2021). **2** P. SEMÉCURBE *et al.*, « New method to define and optimize the diagnostic electrical acquisition channels application to the LMJ DMX plasma diagnostic », *Proceedings of ANIMMA 2009*, DOI : 10.1109/ANIMMA.2009.5503760 (2009).

Moyens métrologiques pour la mesure d'accélération de choc



M. Lavayssière
A. Hottelet
CEA - DAM,
centre de Gramat

M. Techeney
CEA - DAM,
centre du Cesta

Le centre CEA - DAM de Gramat fait développer par le CEA - Leti une chaîne de mesure embarquée innovante, nommée Super-G, pour réaliser des mesures triaxiales de la décélération d'un projectile durant la perforation d'une cible dans le cadre du projet de défense conventionnelle au profit de la Direction générale de l'armement (DGA). Elle comprend un dispositif d'enregistrement miniature et un accéléromètre triaxe. Leur caractérisation métrologique et la qualification de la tenue aux chocs doivent s'effectuer sur les éléments indépendants les uns des autres (capteur ou enregistreur) avec les moyens d'étalonnage et d'essais adaptés et disponibles au CEA - DAM, notamment aux laboratoires de métrologie des centres du Cesta et de Gramat.

La **figure 1** est une synthèse des moyens disponibles pour étalonner le capteur et qualifier la chaîne de mesure à la tenue aux chocs. Elle identifie :

- ▶ les moyens d'étalonnage caractérisant les éléments par rapport à une référence, de type accéléromètre de choc ou jauge de contrainte, dans des gammes de chocs et de fréquences généralement limitées ;
- ▶ les moyens d'essais sollicitant les éléments dans des gammes de chocs et de fréquences qui se rapprochent des conditions d'utilisation finales visées. Ils ne permettent pas de réaliser des caractérisations métrologiques absolues au sens où les données dites de référence ne sont pas raccordées aux étalons nationaux.

Deux formes de marqueurs sont utilisées en fonction de l'appartenance du moyen identifié. Leur positionnement dans le graphe détermine la limite maximale atteignable par ces moyens quant à l'amplitude de choc et à la gamme fréquentielle; ces moyens peuvent néanmoins travailler dans des gammes inférieures.

Une autre méthode de comparaison des sollicitations se fonde sur la notion de spectre de réponse au choc (SRC). Elle permet de s'affranchir de la forme temporelle du signal: la réponse d'un système au choc peut être vue comme la somme des réponses des systèmes à un degré de liberté

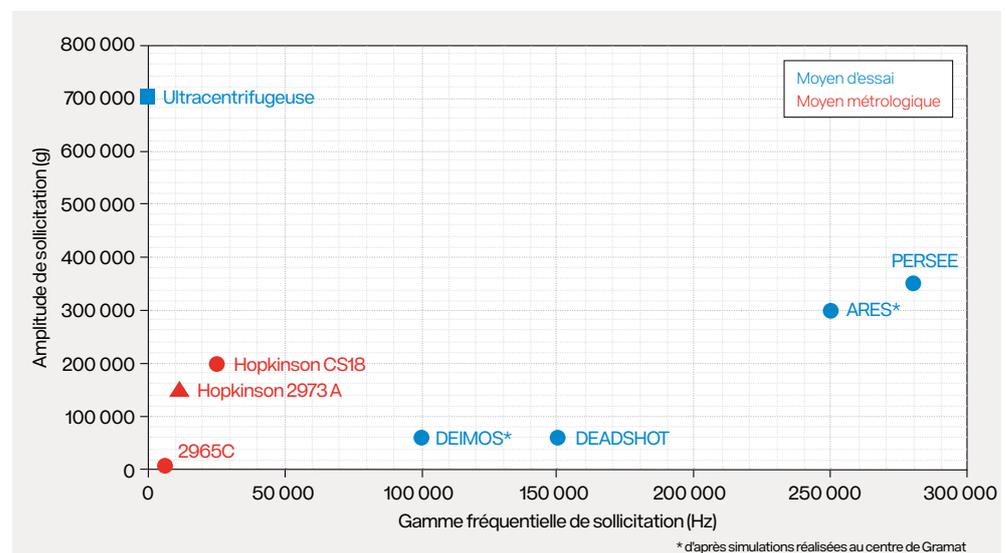


figure 1
Présentation
des moyens d'essais
et d'étalonnage.

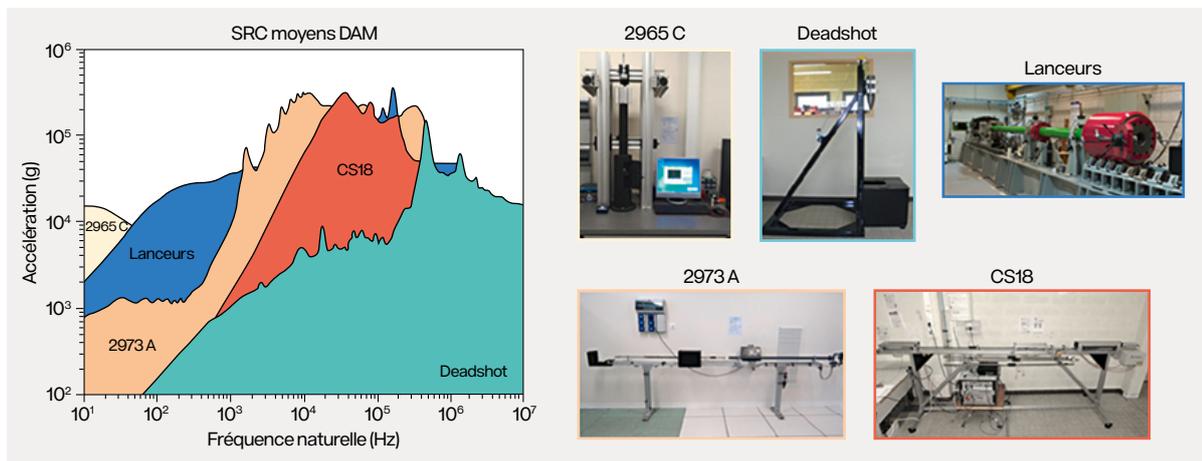


figure 2
Spectre de réponse au choc (SRC) des principaux moyens d'essais et d'étalonnage.

indépendants les uns des autres présentant une fréquence propre qui couvrent la gamme fréquentielle d'intérêt. Soumis à un choc, on reporte sur un graphe leur réponse maximale en fonction de la fréquence propre d'oscillation. La **figure 2** montre la complémentarité des moyens en matière de caractéristiques d'accélération atteignables.

Les moyens d'étalonnage

La tour de chute Endeeco modèle 2965 C est un banc d'étalonnage permettant de générer des impulsions demi-sinus de 20 g à 10000 g et dont les durées peuvent varier de 3 ms à 80 µs grâce à la chute de billes calibrées sur des enclumes spécifiques.

Pour l'étalonnage à des niveaux de choc élevés, la barre de Hopkinson est un moyen plus adapté :

- ▶ l'Endeeco 2973A génère des chocs jusqu'à 120 000 g, soit 1/5 de l'étendue de mesure visée pour le capteur Super-G. Son avantage principal est de fournir des durées d'impulsion larges (supérieures à 100 µs) permettant de solliciter le capteur avec un SRC plus bas en fréquence que les autres moyens. Des travaux sont menés actuellement pour raccorder le capteur de référence (pont de jauges) à un étalon primaire ;
- ▶ la CS18-VHS de Spektra atteint des amplitudes plus élevées, en générant des chocs demi-sinus jusqu'à 200 000 g sur une durée de 20 µs. De plus, elle est utilisable pour des essais accrédités DKD ISO EN 17025 (équivalent du Cofrac en Allemagne). Son incertitude sur la pleine échelle est de ± 8 % et peut descendre à ± 1,5 % après compensation de la dispersion *a posteriori* du signal des jauges de référence **1,2**.

Les moyens d'essais

Les lanceurs sont des moyens capables, par la mise en vitesse d'un projectile, le choix judicieux de son calibre et celui de la composition de la cible, de fournir une large gamme d'impulsions d'accélération-décélération dont les amplitudes peuvent être très variées à basse fréquence, tout en s'accompagnant de chocs additionnels à plus haute fréquence, comme présenté sur la **figure 3**. Ils permettent de tester l'ensemble de la chaîne de mesure, mais sont peu accessibles pour de la métrologie pure en raison de leur

coût d'exploitation et de leur disponibilité, car affectés à des activités opérationnelles.

Un moyen d'essai de laboratoire, Deadshot, permet de tester la fonctionnalité d'une chaîne de mesure embarquée dans un projectile dans le but de valider différents paramètres avant de réaliser l'essai au lanceur : autonomie, déclenchement de l'acquisition et intégration mécanique. Les chocs sont générés par l'impact d'un projectile sans vitesse initiale sur une plaque d'acier.

Des recherches prospectives sont en cours pour identifier d'autres moyens d'essais susceptibles de pouvoir qualifier tout ou partie de la chaîne de mesure globale dans des gammes actuellement non atteintes, tant en amplitude qu'en fréquence. On peut mentionner :

- ▶ l'ultracentrifugeuse, pour atteindre des amplitudes d'accélération continues très élevées, une vitesse de 80 000 tr/min permettant d'atteindre une force centrifuge relative de plus de 600 000 g ;
- ▶ les moyens d'essais de choc contre choc.

La mise en commun des moyens de génération de chocs des centres de Gramat et du Cesta permet de couvrir une large gamme de sollicitations pour qualifier les chaînes de mesure innovantes.

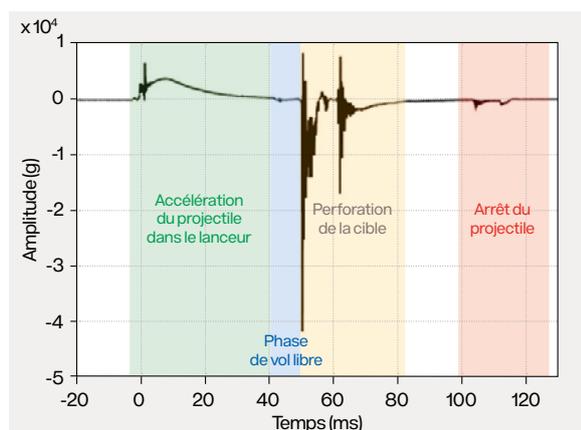


figure 3
Signal temporel de la mise en vitesse d'un projectile avec un lanceur. L'acquisition est réalisée avec la voie interne de l'enregistreur Super-G à 100 kpoints/s.

RÉFÉRENCES

- 1 F. MANDA, M. BRUCKE, M. MENDE**, « Coping with dispersion in Hopkinson-bars », *Proceedings of the XXI IMEKO World Congress "Measurement in research and industry"*, Prague, République tchèque, 30 août-4 septembre 2015 (2015). **2 M. BRUCKE, G. SIEGMUND, C. EHRMANN, U. BÜHN, M. MENDE**, « Comparison of laser vibrometers and strain gauges as reference sensors for high-g shock accelerometer calibration systems », *AMA Conferences*, DOI 10.5162/sensor2013/P1.7 (2013).

La cellule à enclumes de diamant en mode dynamique

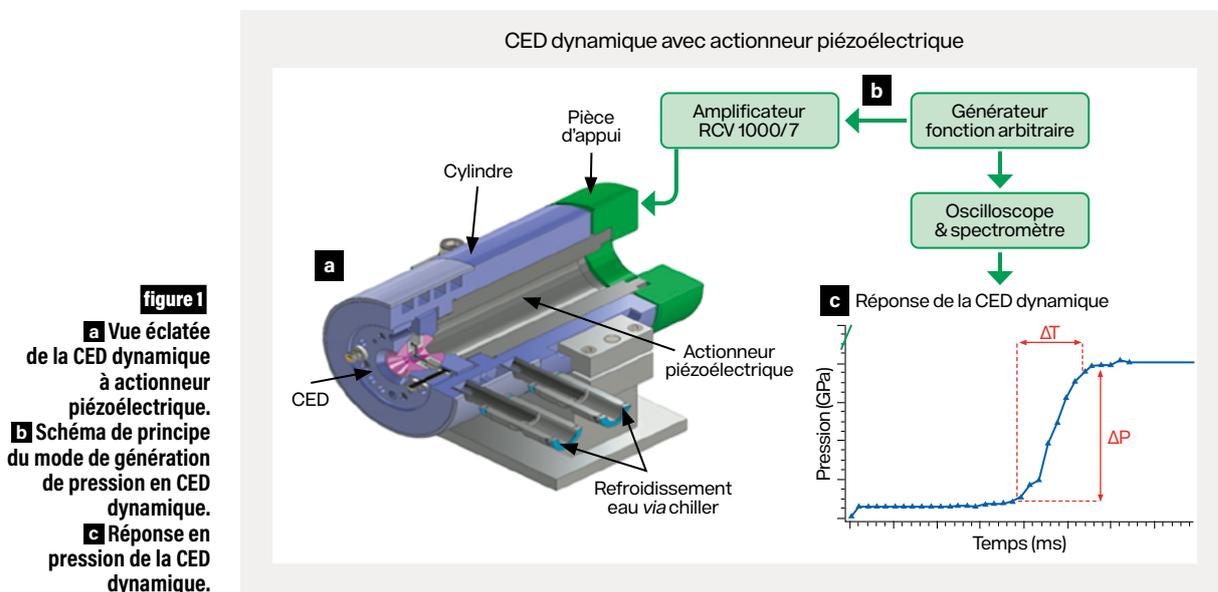


R. André
C. Pépin
F. Ocelli
P. Loubeyre

CEA - DAM,
centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay,
CEA, Laboratoire matière en
conditions extrêmes (LMCE),
Bruyères-le-Châtel

Un nouveau mode de compression des matériaux a été proposé il y a quelques années. Il consiste à générer la pression de manière dynamique dans une cellule à enclumes de diamant en utilisant un actionneur piézoélectrique. Des rampes de compression et de décompression sur des temps de 0,1 à 100 ms peuvent ainsi être produites de manière très contrôlée. Diverses mesures résolues en temps ont été adaptées pour caractériser les propriétés de l'échantillon le long de ces chemins de compression : visualisation optique, valeur de la pression avec la jauge de luminescence du rubis, spectroscopie Raman et diffraction de rayons X à l'aide du rayonnement synchrotron.

Les propriétés des matériaux dans des conditions extrêmes de pression et de température peuvent être caractérisées soit par des méthodes de compression statique dans une cellule à enclumes de diamant (CED), soit par des méthodes de compression dynamique. Les échelles de temps lors de la compression dynamique par canon à gaz ou par laser s'étendent de la microseconde à la nanoseconde. Il est maintenant admis que de tels taux de compression dynamique entraînent des différences notables de comportement par rapport au régime statique, comme des écarts de point de transition de phase, la formation de phases métastables ou une morphologie de croissance cristalline différente. Le nouveau dispositif de la CED dynamique permet de produire des taux de compression intermédiaires entre ceux obtenus en compression dynamique et ceux obtenus en compression quasi statique. Le concept de la CED dynamique a été proposé il y a une quinzaine d'années par une équipe de Livermore [1] ; leur dispositif permettait alors des rampes de compression de quelques dizaines de millisecondes au minimum. Nous développons un dispositif de CED dynamique à l'aide d'un actionneur piézoélectrique qui permet de générer des taux de compression dans un domaine allant de 0,1 à 100 ms. La



variation de certaines propriétés en fonction du taux de compression peut ainsi être explorée sur un large domaine temporel.

Comment fonctionne la CED en mode dynamique ?

Ce dispositif est constitué d'un cylindre en acier qui comporte d'un côté une CED classique et du côté opposé un actionneur piézoélectrique précontraint à 3 kN en contact avec le piston de la CED, le tout étant maintenu par une pièce d'appui (**figure 1**).

Cet actionneur piézoélectrique a une course de 80 à 100 μm et peut générer des forces jusqu'à 35 kN. Il est contrôlé par un amplificateur RCV 1 000 V/7 A qui dispose d'une entrée sur laquelle un générateur de fonction envoie le profil de tension souhaité (impulsion, sinusoïde, trapézoïde ou fonction définie par l'utilisateur). En plaçant un capteur de force piézoélectrique à la place de la CED, on s'assure que la force dynamique appliquée au piston suit bien les profils temporels injectés par le générateur de fonction.

La pression atteinte dans la chambre de la CED dépend directement de la force appliquée et de la dimension de la tête des enclumes de diamant. Ainsi, des temps de montée de pression variant de quelques dizaines de millisecondes à quelques centaines de microsecondes peuvent être imposés.

Il est également possible de faire varier la température : des compressions isothermes ont pu être obtenues grâce à un chauffage local de l'échantillon jusqu'à 800 K. Une technique de joints chauffants a été développée. Un refroidissement de la CED est cependant nécessaire pour éviter la dépoliarisation de l'actionneur piézoélectrique.

La CED dynamique permet donc maintenant d'accéder à des domaines de pression et de température extrêmes pour des taux de compression couvrant plusieurs ordres de grandeur, de quelques secondes à la centaine de microsecondes. Un grand intérêt de la CED dynamique est de pouvoir être associée à un large spectre de mesures microscopiques.

Mesures microscopiques résolues en temps

Les mesures en CED dynamique requièrent une vitesse de répétition qui échantillonne bien la rampe de montée en pression. Deux types de mesures ont été mis en place : des mesures de spectroscopie dans notre laboratoire et des mesures de diffraction des rayons X devant le synchrotron European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), à Grenoble, et le European Free Electron Laser (European XFEL), à Hambourg en Allemagne.

RÉFÉRENCES

1 Z. JENEI *et al.*, « New dynamic diamond anvil cells for tera-pascal per second fast compression x-ray diffraction experiments », *Review of Scientific Instruments*, **90**, 065114 (2019).

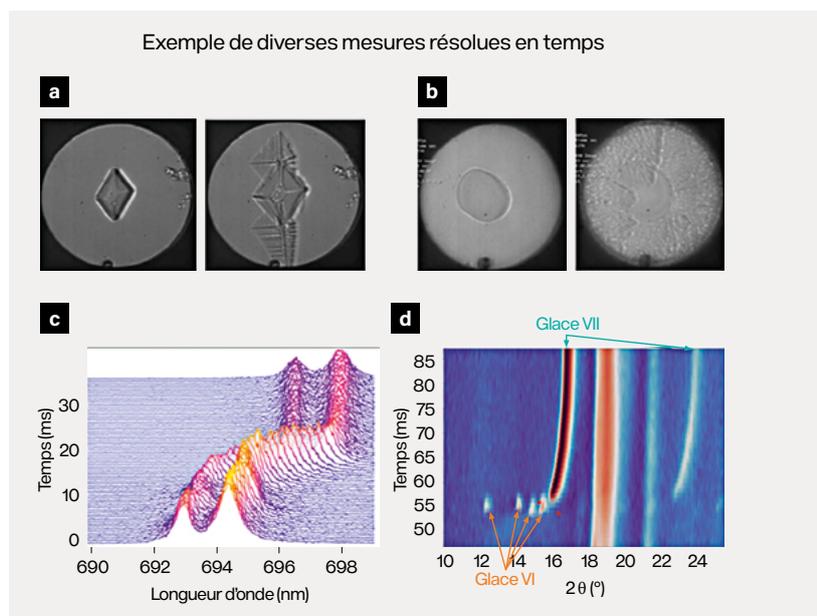


figure 2

a,b Photographies résolues en temps de la croissance d'un monocristal de glace pour des taux de compression **a** de 10 GPa/s et **b** de 1000 GPa/s. **c** Mesure de luminescence de rubis résolue en temps. **d** Mesure de diffractions résolues en temps montrant la transition de phase glace VI à glace VII.

Ainsi, le banc de spectroscopie résolue en temps que nous avons mis en place permet : 1) de faire un film de l'évolution de l'échantillon par la prise de microphotographies lors de la compression rapide à l'aide d'une caméra rapide permettant de prendre jusqu'à 40 000 images par seconde ; 2) de mesurer la pression en utilisant la jauge de pression de luminescence du rubis ; 3) de suivre les changements chimiques par spectroscopie Raman. Ces mesures de spectroscopie se font en utilisant un spectromètre Andor couplé à une caméra CCD (*charge-coupled device*) à amplification de gain en mode dit *Fast Kinetics*. Un générateur de délai et un oscilloscope permettent de synchroniser ces différentes mesures avec le pilotage de l'actionneur piézoélectrique. Cela est illustré sur la **figure 2** par des mesures sur l'eau.

Les mesures de diffraction X résolues en temps dans la CED dynamique ont été réalisées à l'ESRF grâce à un détecteur X Jungfrau pouvant collecter des images de diffraction X jusqu'à une fréquence de 250 kHz. Cette information microscopique a été essentielle pour comprendre la cristallisation de l'eau dans un régime de grande métastabilité lors de forts taux de compression. Une dépendance des points de transition liquide – glace VI – glace VII en fonction de différents taux de compression est clairement observée.

Nous développons actuellement un banc d'absorption infrarouge résolu en temps qui devrait permettre un échantillonnage des spectres toutes les 10 μs . Le projet ambitieux qui motive ce développement vise à suivre les changements chimiques dans un matériau énergétique à l'approche de sa détonation.

Le centre NV : un capteur quantique multifonction



L. Toraille
T. Plisson
CEA - DAM,
centre DAM Île-de-France

F. Ocelli
P. Loubeyre
CEA - DAM,
centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay,
CEA, Laboratoire matière
en conditions extrêmes
(LMCE), Bruyères-le-Châtel

A. Hilberer
M.-P. Adam
M. Schmidt
J.-F. Roch
Laboratoire Lumière,
matière et interfaces
(LuMIn), UMR 9024
CNRS - Université Paris-
Saclay, ENS Paris-Saclay,
CentraleSupélec,
Gif-sur-Yvette

Les propriétés quantiques fondamentales du centre NV du diamant (*Nitrogen Vacancy*, ou centre azote-lacune du diamant) font de celui-ci un capteur multifonction aux performances remarquables qui combine sensibilité, résolution et compacité. Ces propriétés rendent possible son utilisation pour étudier les comportements des matériaux à haute pression et ont par exemple permis de vérifier la simultanéité de la transition magnétique et de la transition cristalline du fer sous pression.

Les technologies quantiques ouvrent la voie à une nouvelle génération de capteurs. Les propriétés intrinsèques des capteurs quantiques permettent d'atteindre une sensibilité et une résolution extrêmes, et de conserver l'avantage des dispositifs compacts et robustes, ce qui les rend essentiels pour maintenir l'expertise technique du CEA - DAM.

Parmi ces capteurs, les centres NV du diamant sont particulièrement prometteurs. Ils offrent de nouvelles possibilités de mesure de champ magnétique, de température, de pression ou même de signaux radiofréquences. Ils sont utilisés au centre CEA - DAM du Ripault dans des travaux menés afin de mesurer la conductivité thermique de matériaux avec une précision inégalée. Au centre DAM Île-de-France, ils sont utilisés comme capteurs magnétiques pour l'étude de matériaux à haute pression : en effet, ils permettent de s'adapter aux contraintes associées aux hautes pressions et à la petite taille des échantillons.

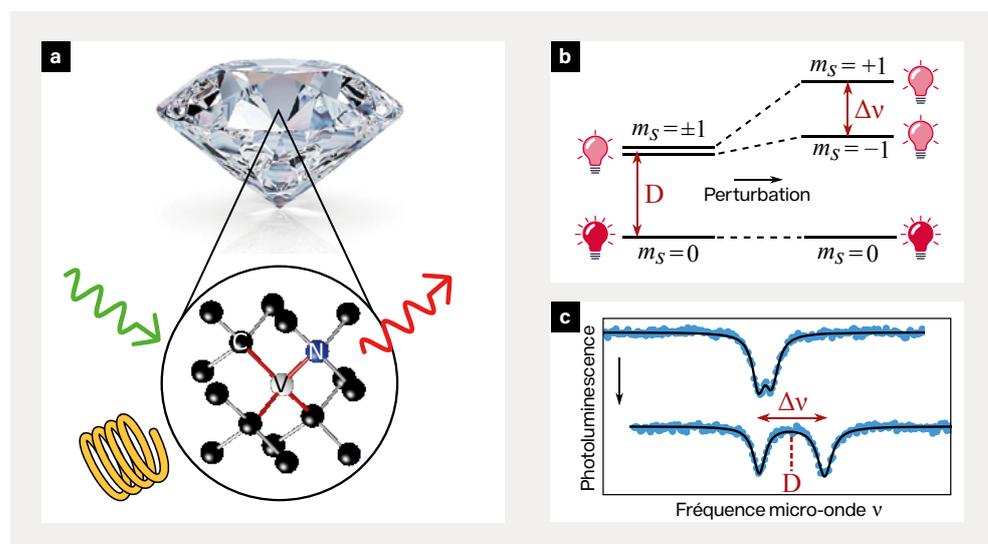


figure 1

a Les centres NV sont des défauts atomiques du diamant constitués de l'association d'un atome d'azote et d'une lacune adjacente substitués aux atomes de carbone. Sous excitation optique, ils émettent une luminescence dans le domaine visible. **b** Dans son état fondamental, le centre NV a trois niveaux d'énergie. Les deux niveaux +1 et -1 sont moins luminescents que le niveau 0 et se déplacent sous l'effet d'une perturbation. **c** Lors du balayage de la fréquence d'une excitation micro-onde, la photoluminescence émise par les centres NV diminue ponctuellement. Cette diminution indique la position des niveaux d'énergie +1 et -1 et permet de caractériser la perturbation initiale.

Le centre NV est un défaut atomique du diamant, constitué de l'association d'un atome d'azote et d'une lacune adjacente qui se sont substitués à des atomes de carbone du réseau cristallin (**figure 1**). C'est un objet luminescent qui émet dans le domaine visible. Il a une structure de niveaux d'énergie bien particulière, avec trois niveaux de spin dans son état fondamental : le niveau correspondant au nombre quantique $m_s = 0$, séparé des niveaux dégénérés $m_s = \pm 1$ d'une quantité $D = 2,87$ GHz dans des conditions ambiantes. La luminescence émise par les centres NV dans les niveaux ± 1 est plus faible que celle émise depuis le niveau 0. Cela permet de détecter optiquement la position des niveaux d'énergie : en balayant une excitation micro-onde couplée à une excitation optique, on observe une baisse de la luminescence lorsque la fréquence micro-onde est résonante avec la transition entre les niveaux 0 et +1 ou -1.

En présence d'une perturbation, les niveaux d'énergie des centres NV se déplacent de différentes façons selon la nature de la perturbation (pression, température, champ magnétique). On peut alors obtenir une valeur quantitative de la perturbation par simple mesure de la luminescence émise par les centres NV.

L'utilisation des centres NV comme capteurs à l'intérieur d'une cellule à enclumes de diamant est naturelle : en implantant les centres NV directement à la surface d'une enclume, on obtient un capteur placé au plus proche de l'échantillon. L'excitation et la collection optique se font à travers le diamant et le joint métallique placé entre les enclumes sert d'antenne pour l'excitation micro-onde **1**. Ce dispositif permet de mesurer des champs magnétiques de l'ordre du micromètre et des pressions allant jusqu'à plus de 130 gigapascals (GPa).

Les propriétés magnétiques du fer sous pression ont été revisitées à l'aide des centres NV. Le fer est ferromagnétique à pression ambiante et perd son magnétisme à environ 15 GPa. L'aimantation d'une bille de fer de $5 \mu\text{m}$ a été mesurée en fonction de la pression (**figure 2**). On observe la disparition progressive de l'aimantation lorsque la pression dépasse 15 GPa. La simplicité et la compacité du dispositif ont permis de reproduire cette expérience au synchrotron Soleil, sur le plateau de Saclay, parallèlement à l'observation de la structure cristalline du fer par diffraction de rayons X **2**. Les résultats ont confirmé la simultanéité de la perte des propriétés magnétiques et de la transition cristalline entre les phases α et ϵ du fer.

Les développements se poursuivent pour perfectionner la technique, notamment à plus haute pression. Une mesure magnétique est un excellent moyen de détecter la supraconductivité : les centres NV sont ainsi un nouvel outil pour étudier les superhydrures, matériaux supraconducteurs à haute pression et à des températures proches de la température ambiante.

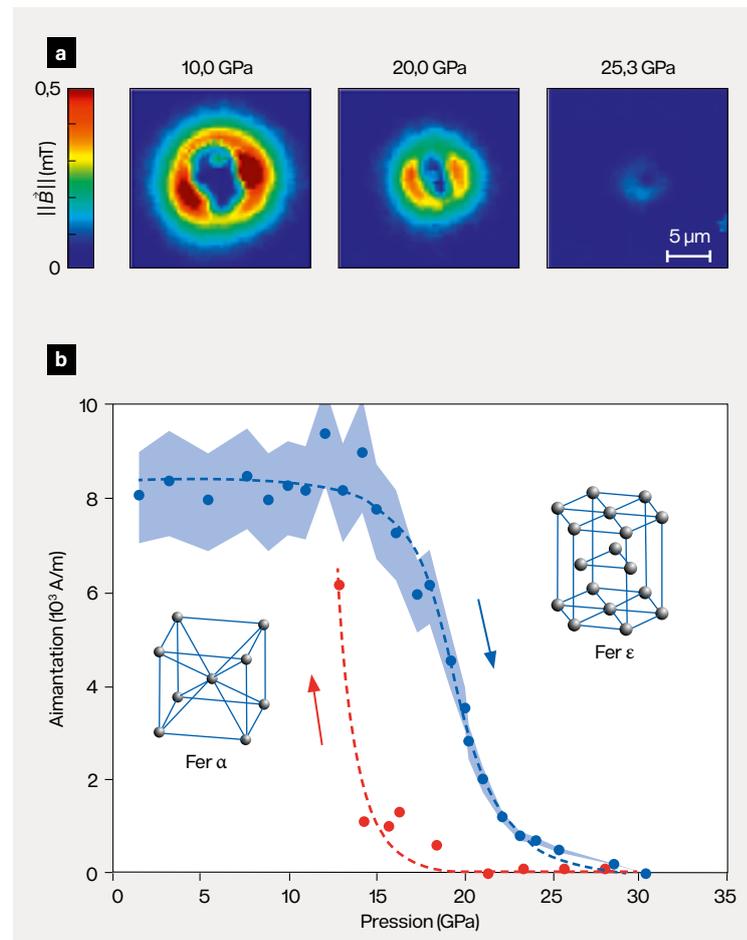


figure 2

a Cartographie du champ magnétique créé par une bille de fer de $5 \mu\text{m}$, pour différentes valeurs de pression. On observe distinctement la disparition de ce champ lorsque la pression augmente. **b** Tracé de l'évolution de l'aimantation de la bille de fer en fonction de la pression, obtenue grâce aux mesures du champ magnétique. **Bleu** : compression ; **rouge** : décompression. La disparition de cette aimantation se produit simultanément à la transition entre les deux phases cristallines α et ϵ . L'aimantation réapparaît lors de la décompression.

RÉFÉRENCES

- 1** L. TORAILLE, M. LESIK, T. PLISSON *et al.*, « Magnetic measurements on micrometer-sized samples under high pressure using designed NV centers », *Science*, **366**, 6471, p. 1359-1362 (2019). **2** L. TORAILLE *et al.*, « Combined synchrotron x-ray diffraction and NV diamond magnetic microscopy measurements at high pressure », *New J. Phys.*, **22**, 103063 (2020).

Mesure des vitesses du son en conditions extrêmes



A. Forestier
G. Weck,
P. Loubeyre

CEA - DAM,
centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay,
CEA, Laboratoire matière
en conditions extrêmes
(LMCE), Bruyères-le-Châtel

F. Datchi

Institut de minéralogie,
de physique des matériaux
et de cosmochimie, UMR
7590 CNRS - Sorbonne
Université, Paris

Une nouvelle approche expérimentale a été mise en place pour mesurer la vitesse du son de matériaux en conditions extrêmes. Les verrous qui empêchaient ce type de mesure ont été levés grâce à l'utilisation d'un nouveau concept de spectromètre, basé sur la technologie *Vipa* (*Virtually Imaged Phased Array*), et grâce au développement de nouveaux confinements d'échantillon. Cette approche est maintenant très prometteuse pour obtenir les propriétés thermodynamiques des fluides moléculaires denses et chauds, et en particulier des produits de détonation, appelés prodets.

La prédiction du pouvoir énergétique d'un explosif, calculé par le code de thermo-chimie Carte, demande une bonne connaissance des propriétés thermodynamiques des prodets, principalement constitués de mélanges de fluides moléculaires H_2O , CO_2 , N_2 dans des conditions de pression et de température extrêmes ($P = 0$ à 50 GPa, $T = 300$ à 6000 K). Pour cela, la vitesse du son dans ces mélanges, directement reliée à leur compressibilité, est une donnée très intéressante. Par intégration thermodynamique de la mesure de la vitesse du son dans un domaine P-T, on remonte directement à l'équation d'état de ces systèmes moléculaires, ce qui est aussi une brique importante pour les modèles d'intérieurs planétaires. Jusqu'à présent, de telles données de vitesse du son étaient quasi inexistantes. Cela s'explique par la difficulté de mettre en place des mesures de diffusion Brillouin en conditions extrêmes. Nous avons porté

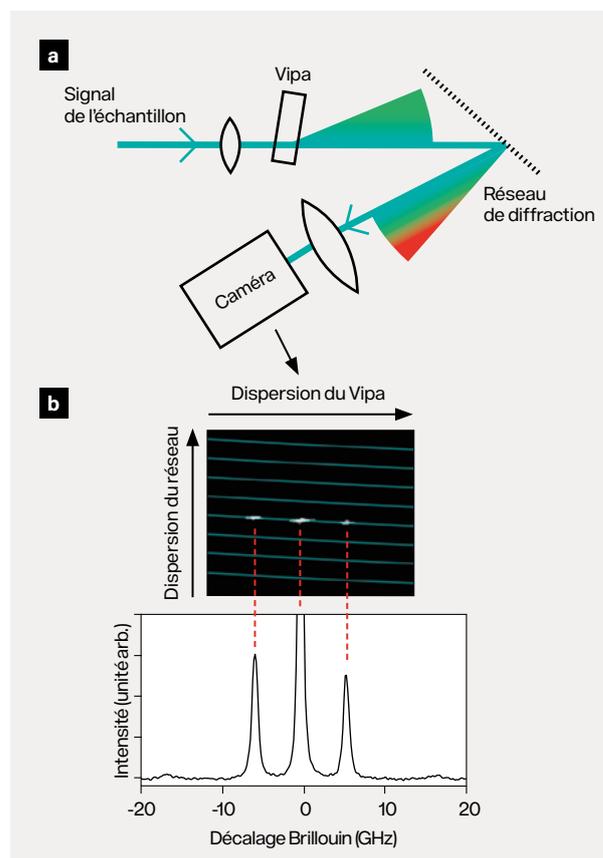


figure 1

a Principe du spectromètre Brillouin hyperfin. La lumière diffusée par l'échantillon est dispersée par le Vipa, puis par un réseau de diffraction dans une direction orthogonale afin de produire une image sur la caméra. **b** L'image obtenue permet de reconstruire le spectre Brillouin de l'échantillon.

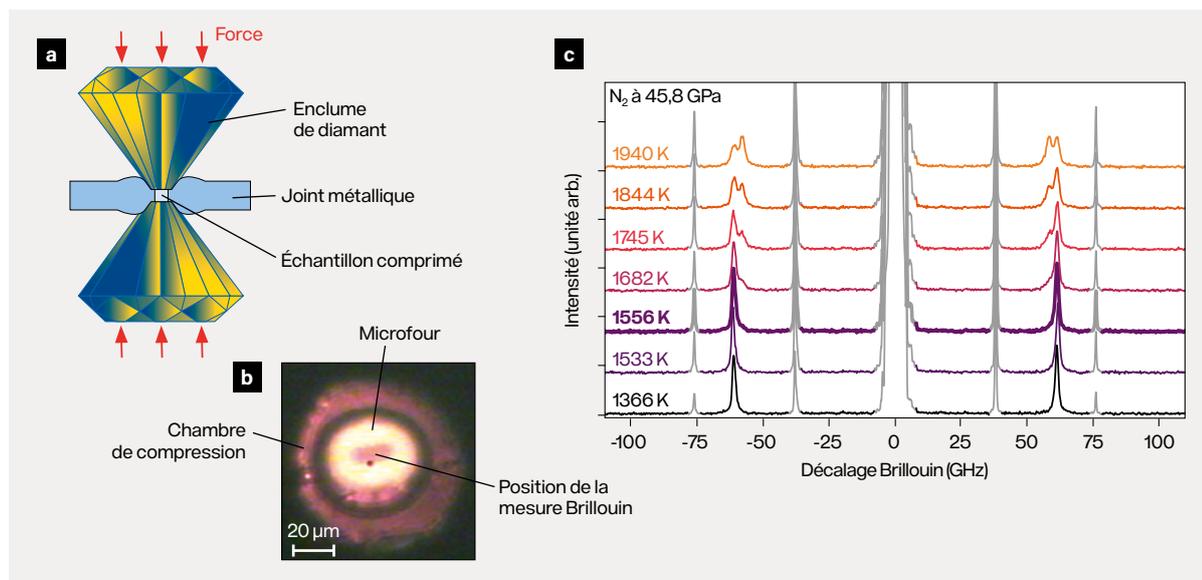


figure 2

a Principe de la cellule à enclumes de diamant : l'échantillon est comprimé entre deux pointes de diamant monocristallin. **b** Photographie en vue de dessus d'un échantillon d'azote avec un microfour torique chaud dans la chambre de compression. **c** Spectres Brillouin de N₂ à 45,8 GPa et à haute température.

nos efforts sur la production d'échantillons de fluides moléculaires optimisés pour les mesures Brillouin dans la zone thermodynamique d'intérêt.

Nos échantillons de fluides moléculaires denses et chauds sont comprimés dans une presse à enclumes de diamant et chauffés par un laser infrarouge. Dans la chambre de compression, un microfour torique en diamant dopé au bore permet le chauffage indirect du système moléculaire en absorbant le laser de chauffe. L'objectif est de confiner le système à une température la plus homogène possible au sein du trou central du microfour où est réalisée la mesure spectroscopique. La pression est déterminée au moyen d'une jauge de luminescence et la température par radiométrie d'émission thermique.

La diffusion inélastique Brillouin est directement reliée à la vitesse du son. Ainsi, une vitesse du son de 5 km/s donne un décalage fréquentiel de la lumière diffusée de l'ordre du cm^{-1} (10 GHz). La mesure Brillouin nécessite donc une très grande résolution spectrale. L'instrument de référence des mesures Brillouin est l'interféromètre tandem Fabry-Pérot dont un inconvénient est le temps d'acquisition du signal qui peut atteindre plusieurs dizaines de minutes. Il est peu adapté à des mesures en conditions extrêmes, qui nécessitent des mesures rapides et reproduites plusieurs fois pour contrôler les effets parasites, comme l'attaque chimique de l'échantillon par son environnement.

C'est pourquoi nous avons utilisé un nouveau type de spectromètre hyperfin qui emploie la technologie Vipa. Cette technologie permet de disperser la lumière dans l'espace à la façon d'un réseau de diffraction

(figure 1) plutôt que d'effectuer une décomposition temporelle comme dans le cas de l'interféromètre tandem Fabry-Pérot. Cela permet une réduction drastique des temps d'acquisition des signaux. Nous avons réalisé une étude comparative des deux instruments afin de valider les avantages de cette nouvelle approche. Le spectromètre Vipa permet des mesures environ dix fois plus rapides sur des échantillons comprimés à haute pression **1**. La contrepartie est un élargissement spectral des signaux Brillouin, qui n'influence pas la détermination des vitesses du son.

Afin de montrer l'efficacité du nouveau montage pour l'étude des fluides denses et chauds, nous avons mené une étude sur le diazote à haute pression. Cette mesure localisée nécessite un excellent filtrage spatial de la lumière à l'échelle de quelques microns, ce que permet notre nouveau montage par son couplage par fibres optiques et son haut niveau de signal. La figure 2 montre la configuration expérimentale et un exemple de spectres Brillouin obtenus. Sur les spectres de la figure 2c, la fusion du diazote est détectée par l'apparition d'un second pic à plus basse fréquence, attribué à la vitesse du son dans la phase fluide inférieure à celle du solide. Les températures de fusion obtenues en fonction de la pression sont en accord avec la littérature.

Le spectromètre hyperfin Vipa a été mis en œuvre pour la première fois avec succès dans le contexte des hautes pressions. Ce nouvel outil permet des mesures de vitesse du son au moins dix fois plus rapidement que ce qui était possible auparavant et devrait permettre d'acquérir des données utiles pour la thermodynamique des prodets et pour les intérieurs planétaires.

RÉFÉRENCES

1 A. FORESTIER, G. WECK, F. DATCHI, P. LOUBEYRE, « Performances of a VIPA-based spectrometer for Brillouin scattering experiments in the diamond anvil cell under laser heating », *High Pressure Research*, 42:3, p. 259-277 (2022).

Innovations majeures pour la mesure des radioxénons et la surveillance du Tice



A. Cagniant
P. Gross
G. Douysset
S. Topin

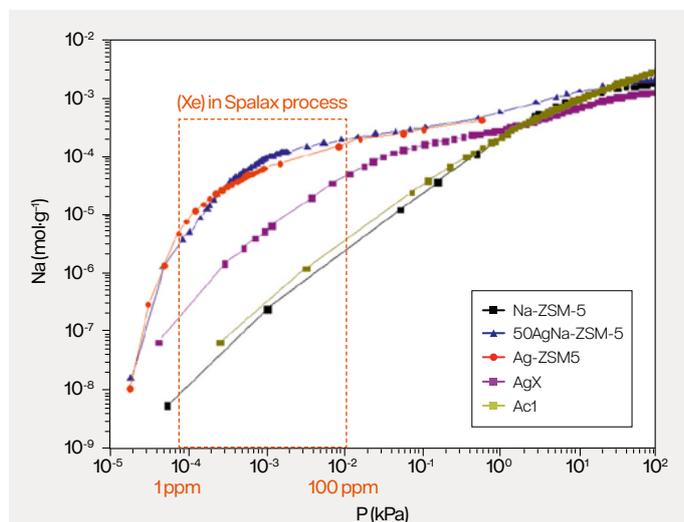
CEA – DAM,
centre DAM Île-de-France

Pour la vérification du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Tice), un réseau de capteurs est installé sur l'ensemble du globe afin de détecter les observables émises lors d'un essai. Le CEA – DAM, en tant qu'opérateur technique pour la France, pilote le développement d'un système permettant l'échantillonnage et l'analyse radiologique du xénon présent dans l'air, appelé système Spalax. La nouvelle génération de système permet un gain d'un ordre de grandeur en sensibilité grâce à une nouvelle technique de spectrométrie par coïncidence électron-photon et à un nouveau procédé de traitement du xénon.

La détection des essais nucléaires confinés au moyen de la mesure des radioxénons qui ont diffusé dans l'atmosphère nécessite de mesurer quelques centaines d'atomes radioactifs par mètre cube d'air. Historiquement, trois technologies, portées chacune par des États signataires du Tice, ont été installées au début des années 2000 sur le réseau de surveillance du traité: le système Sauna (Suède), le système Arix (Russie) et le système Spalax (France, CEA – DAM). Il s'est avéré que les spécifications techniques initiales de ces stations pouvaient être insuffisantes pour discriminer un essai nucléaire et qu'il était nécessaire d'augmenter leur sensibilité pour la détection des quatre radioxénons d'intérêt: le ^{131m}Xe , le ^{133m}Xe , le ^{133}Xe et le ^{135}Xe . Ainsi, à partir de 2015, le CEA – DAM a développé le système Spalax-Nouvelle Génération, ou Spalax-NG, pour améliorer l'efficacité d'échantillonnage et de mesure.

Le procédé permettant l'échantillonnage et le traitement du xénon contenu dans l'air est basé sur l'utilisation de compresseurs d'air, de membranes de perméation et de matériaux

figure 1
Capacité d'adsorption du xénon (Na en mol.g⁻¹) en fonction de sa pression partielle (P en kPa) pour différents matériaux. Les courbes **bleue** et **rouge** sont les capacités d'adsorption du matériau développé au CEA – DAM. Les autres sont celles des matériaux du commerce classiquement utilisés. Dans la zone d'utilisation (soulignée en pointillé **orange**), les matériaux développés pour le Spalax sont supérieurs de plusieurs ordres de grandeur aux autres matériaux.



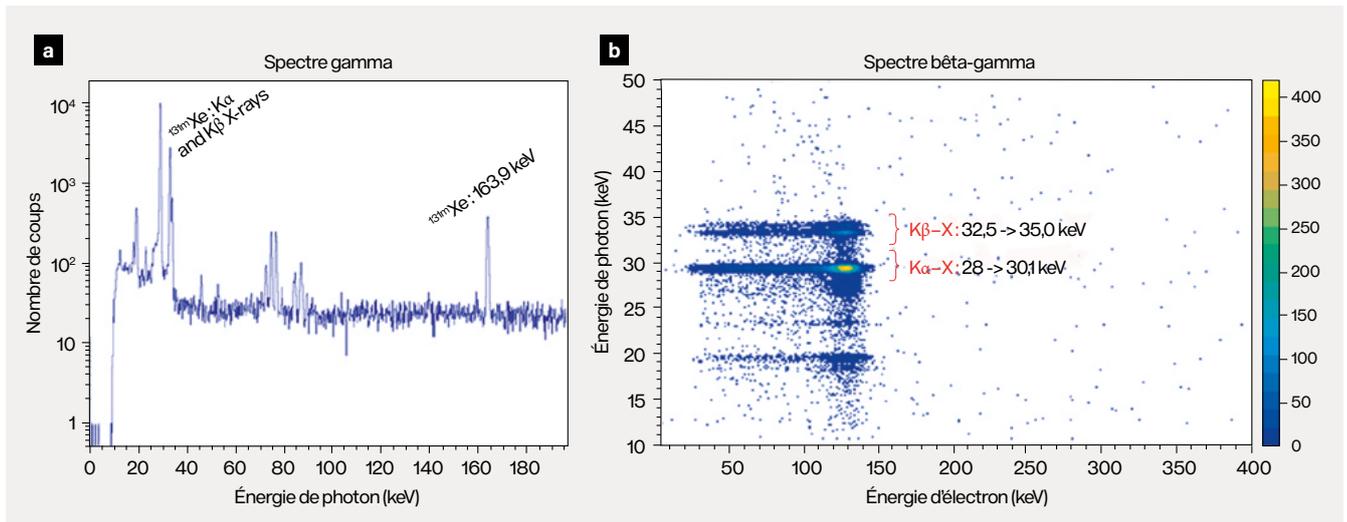


figure 2

Mesure d'un échantillon de ^{131m}Xe . **A** Spectre gamma (à une dimension). **B** Spectre de coïncidence bêta-gamma à haute résolution (l'échelle de couleur est proportionnelle au nombre de coups, un point bleu représente un coup). Le spectre de coïncidence montre la très forte réduction du bruit de fond de la mesure puisque seul le signal d'intérêt est visible.

adsorbants poreux. De nouvelles technologies de compresseurs et de membranes ont été mises en œuvre. Par ailleurs, le CEA – DAM a spécifiquement développé une zéolithe échangée à l'argent Ag@ZSM-5 **2**, matériau adsorbant qui est aujourd'hui le plus performant pour la concentration du xénon de l'air (figure 1). Cela a permis de diminuer de 24 h à 8 h le temps nécessaire à la production d'un échantillon de xénon tout en augmentant la pureté.

Le CEA – DAM a développé une technique de spectrométrie par coïncidence électron-photon à haute résolution. Ainsi, plutôt que de mesurer les seules émissions de photons γ d'un échantillon (rendement faible pour le ^{131m}Xe et le ^{133m}Xe), cette nouvelle technique permet la mesure en coïncidence des émissions β^- et γ (électron β^- en coïncidence avec un photon γ) des ^{133}Xe et ^{135}Xe , et des émissions EC-K et K α -X (électron de conversion de couche K en coïncidence avec un photon X de couche K) des ^{131m}Xe et ^{133m}Xe , avec un bruit de fond extrêmement réduit (figure 2).

Ce développement a nécessité la mise au point d'une cellule contenant l'échantillon de gaz équipée de détecteurs d'électrons β^- ou EC **1**. C'est ainsi qu'a été industrialisé, sous licence avec la société Mirion Technologies, le détecteur PIPSBox (figure 3). Couplé à un détecteur au germanium (HPGe) pour la mesure des photons, le spectromètre ainsi créé permet une mesure à haute résolution en énergie et à bas bruit de fond des photons et électrons émis simultanément (2 μs) lors de la décroissance d'un noyau. Un blindage radiologique actif a été spécialement conçu pour réduire le bruit de fond. Un protocole d'étalonnage a été spécifiquement développé, basé sur un modèle de simulation

Monte-Carlo et l'utilisation de sources radioactives. Enfin, les outils informatiques pour l'analyse des spectres d'acquisition ont été développés, validés puis fournis à l'Organisation du Tice.

Après validation de l'ensemble de ces développements par les experts de la communauté, le Spalax-NG a obtenu sa qualification Otice le 14 juillet 2021 après une phase d'une année de bon fonctionnement. Cette phase a été l'occasion de démontrer le gain majeur apporté par ce nouveau système **3**. En particulier, le Spalax-NG a permis de gagner un ordre de grandeur en sensibilité pour la détection des ^{131m}Xe et ^{133m}Xe . Plus qu'une évolution, le passage à cette nouvelle technologie est reconnu comme une révolution !

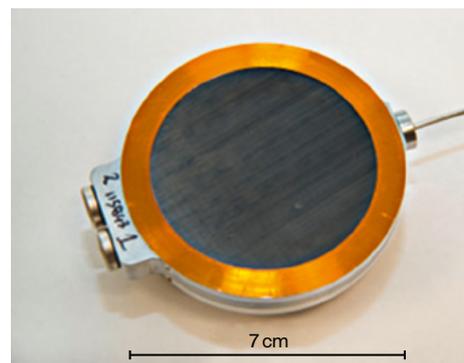


figure 3

Photographie du détecteur PIPSBox. La cellule est en aluminium bas bruit et les fenêtres sont en fibre de carbone de 500 μm . Deux connectiques permettent de polariser les détecteurs Si-pin et une sortie gaz permet d'injecter et d'extraire les échantillons gazeux.

RÉFÉRENCES

1 A. CAGNIANT, *Développement et modélisation d'un spectromètre multidétecteur Ge/Si pour la détection des ultra-traces de produits de fission dans l'environnement*, thèse de l'université Pierre-et-Marie-Curie, Paris 6 (2015). **2** L. DELIÈRE, *Adsorption et séparation des gaz rares sur des adsorbants dopés à l'argent*, thèse de l'université Claude-Bernard, Lyon 1 (2015). **3** S. TOPIN, P. GROSS, P. ACHIM, S. GENEROSO, A. CAGNIANT, O. DELAUNE, M. MORIN, T. PHILIPPE, J.-P. FONTAINE, C. MOULIN, G. DOUYSSSET, G. LE PETIT, « 6 months of radioxenon detection in Western Europe with the SPALAX-New Generation system - Part1: Metrological capabilities », *J. Env. Radioactivity*, **225**, 106442 (2020).

Étalonnage de films radiochromiques pour la radiographie par proton



I. Lantuéjoul
B. Vauzour
A. Duval
N. Grantais
B. Marchet
C. Reverdin
J. Brisset
S. Martinez
M. Osmond
C. Varignon

CEA - DAM,
centre DAM Île-de-France

G. Boutoux
CEA - DAM,
centre du Cesta

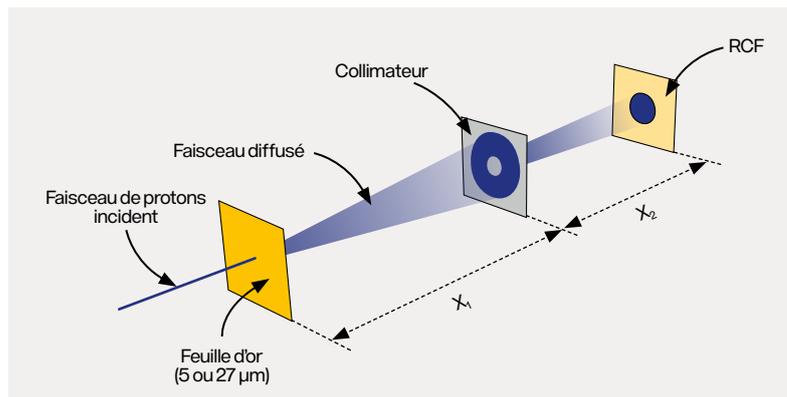
Les films radiochromiques sont régulièrement utilisés pour la détection de protons lors d'expériences d'interaction laser-plasma. Ils possèdent la propriété de noircir lors de l'interaction d'une particule dans leur couche sensible. Ils permettent ainsi de visualiser l'empreinte d'un faisceau de particules et peuvent être utilisés pour réaliser des images de radiographie. Des campagnes d'étalonnage ont été réalisées auprès des accélérateurs électrostatiques du CEA - DAM Île-de-France afin de déterminer la relation entre l'énergie déposée dans un film et sa transmission optique. Ces mesures ont permis les caractérisations spectrale et spatiale des premiers faisceaux de protons générés avec le laser Petal.

Situé au sein de l'installation Laser Mégajoule (LMJ), Petal, acronyme de PETawatt Aquitaine Laser, est un laser à ultra-haute intensité pouvant délivrer une impulsion d'une énergie de l'ordre du kilojoule pendant une durée de l'ordre de la picoseconde ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). Ce type de laser permet de créer des faisceaux de particules chargées et en particulier des faisceaux de protons de haute énergie (plusieurs dizaines de MeV). Ces faisceaux de protons peuvent notamment être utilisés pour réaliser des images de radiographie de matériaux denses ou pour

étudier des champs magnétiques.

L'interaction du faisceau de Petal avec une cible génère une impulsion électromagnétique intense excluant l'utilisation d'équipements électroniques standards pour l'acquisition des images. Les diagnostics associés au laser Petal sont ainsi munis de capteurs passifs de type film de radiographie. Dans le cas de la radiographie par proton, un empilement de films radiochromiques (RCF) est inséré dans la chambre d'expériences du LMJ de dix mètres de diamètre au plus près de la cible (10 cm). Le noircissement des films lors de l'interaction avec une particule permet de faire une « empreinte » du faisceau de particules incident et donc de reconstruire sa géométrie. Ce noircissement étant progressif en fonction de la dose déposée, un étalonnage de la transmission optique des films en fonction de l'énergie déposée permet de déterminer le nombre de particules incidentes ayant interagi avec un film. De plus, l'utilisation d'un empilement permet d'accéder au spectre en énergie des protons. En effet, leur

figure 1
Configuration expérimentale utilisée sur les accélérateurs 4 MV et Nénuphar pour l'étalonnage des films radiochromiques. Le faisceau de protons incident est diffusé par une mince feuille d'or. La partie centrale du faisceau diffusé est sélectionnée à l'aide d'un collimateur afin d'obtenir un faisceau homogène sur le film. La dynamique des films est explorée en faisant varier le temps d'exposition et le courant de l'accélérateur.



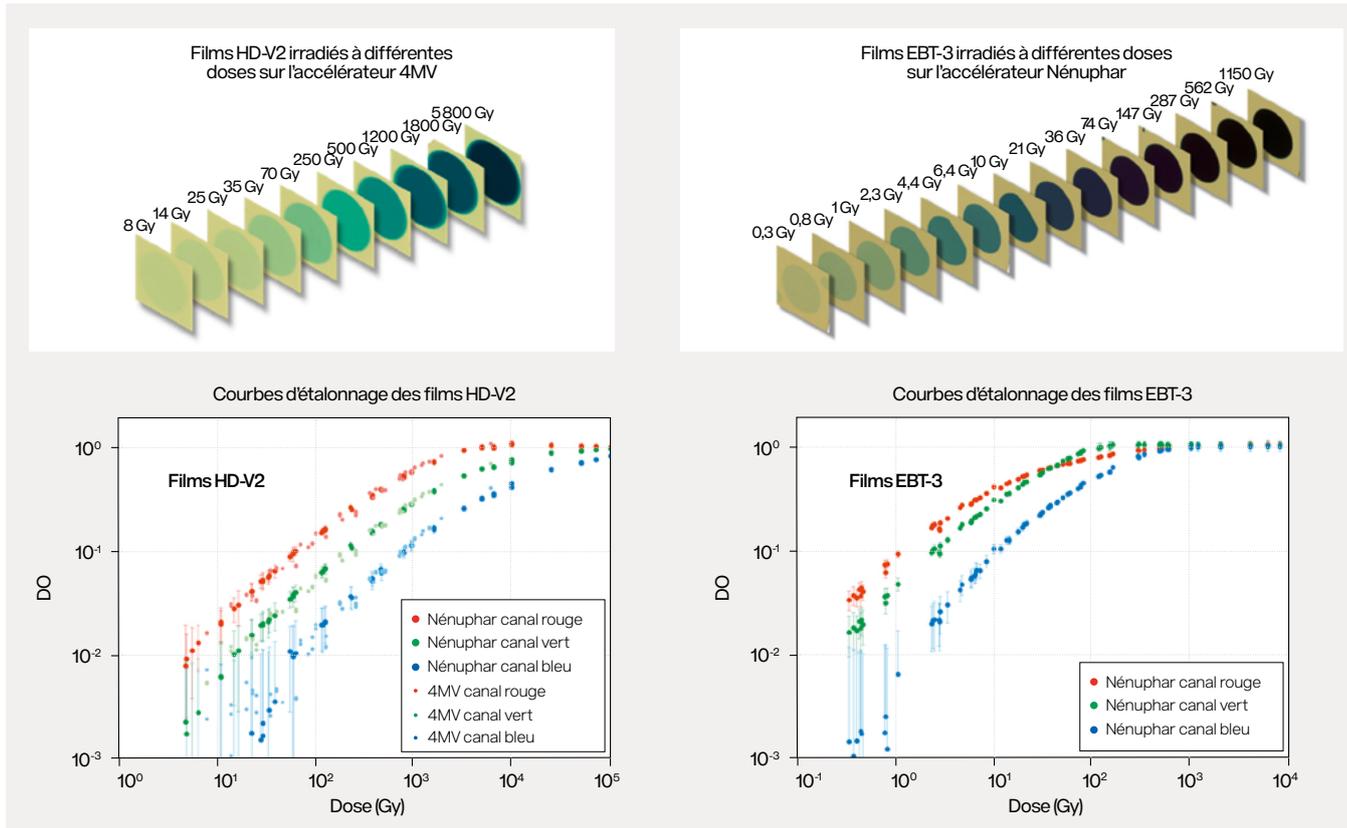


figure 2

Courbes d'étalonnage des films HD-V2 et EBT-3. Elles présentent la relation entre la densité optique du film (DO) et la dose déposée dans celui-ci. La numérisation sur trois canaux (RGB) permet d'augmenter la dynamique. Les mesures ont été réalisées sur les accélérateurs 4 MV et Nénuphar pour les films de type HD-V2. Seul l'accélérateur Nénuphar permet un étalonnage des films de type EBT-3.

dépôt d'énergie, sous la forme d'une courbe de Bragg, permet d'associer chacun des films de l'empilement à une énergie incidente préférentielle.

L'étalonnage de différents types de RCF a été réalisé auprès des accélérateurs électrostatiques 4 MV et Nénuphar du CEA – DAM Île-de-France. Les résultats présentés concernent les films HD-V2 et EBT-3 de la marque Gafchromic **1**, utilisés lors des expériences avec Petal. Au cours des campagnes d'étalonnage, un faisceau continu de protons monoénergétiques est envoyé sur les films. Le faisceau de protons incident est diffusé par une mince feuille d'or (quelques micromètres). La partie centrale du faisceau diffusé est sélectionnée par un collimateur avant d'arriver sur le film (**figure 1**). Cette géométrie d'irradiation permet de produire un faisceau de protons large et homogène dans sa direction transverse, permettant de faire des mesures précises et très reproductibles. Des énergies incidentes de 1,15 à 3,5 MeV ont été utilisées sur l'accélérateur 4 MV et de 6 MeV sur l'accélérateur Nénuphar. Pour chaque énergie incidente, la totalité de la dynamique des films a

été couverte en faisant varier la durée d'exposition et le courant de l'accélérateur.

Les premières mesures réalisées sur l'accélérateur 4 MV ont montré que lorsque le proton est arrêté dans la couche sensible du film, sa réponse dépend de l'énergie incidente. Cette réponse devient indépendante de l'énergie lorsque celle-ci est suffisante pour traverser le film. Les films HD-V2 de faible épaisseur ont ainsi pu être étalonnés sur l'accélérateur 4 MV où une énergie incidente minimum sur le film de 0,8 MeV est nécessaire. Dans le cas des films EBT-3 plus épais, une énergie minimale sur le film de 4 MeV est nécessaire. L'utilisation de l'accélérateur Nénuphar, qui fournit des protons de plus haute énergie, est alors nécessaire. Les courbes d'étalonnage obtenues sont présentées sur la **figure 2**.

Les faisceaux de protons générés lors des premières expériences utilisant le laser Petal ont été caractérisés à l'aide d'empilements de films radiochromiques. Les étalonnages présentés ont permis leur caractérisation absolue tant spatialement que spectralement **2**.

RÉFÉRENCES

1 www.gafchromic.com **2** D. RAFFESTIN, L. LECHERBOURG, I. LANTUÉJOUL, B. VAUZOUR, P.-É. MASSON-LABORDE, X. DAVOINE, N. BLANCHOT, J.-L. DUBOIS, X. VAISSEAU, E. D'HUMIÈRES, L. GREMILLET, A. DUVAL, C. REVERDIN, B. ROSSÉ, G. BOUTOUX, J.-É. DUCRET, C. ROUSSEAU, V. TIKHONCHUK, D. BATANI, « Enhanced ion acceleration using the high-energy petawatt PETAL laser », *Matter and Radiation at Extremes*, 6, 056901 (2021).

Monitoring dynamique de l'impact des activités industrielles



N. Saurel
L. Poirier-Herbeck
CEA - DAM,
centre de Valduc

E. Lahalle
S. Marcos
Laboratoire des signaux
et systèmes (L2S),
UMR 8506 CNRS -
CentraleSupélec -
Université Paris-Saclay,
Gif-sur-Yvette

L'impact de l'activité humaine sur l'environnement est une problématique sociétale majeure. Être à l'écoute de sa protection est un principe essentiel. En conséquence, le législateur impose un monitoring des constantes représentatives de toutes nocivités potentielles, particulièrement celles de l'industrie. Le centre CEA - DAM de Valduc assure cette surveillance pour l'ensemble de son site et l'extérieur de celui-ci. L'enjeu est donc de déterminer en dynamique la présence de précurseurs d'impact, tout en appréhendant les variations naturelles influençant le monitoring. Faire parler ces séries temporelles grâce à l'intelligence artificielle ouvre des perspectives de traitement et de réactivité présentées ici pour exalter la réponse à l'enjeu.

L'empreinte environnementale du site de Valduc est contrôlée directement à la sortie de l'exutoire de l'installation produisant la substance et à des emplacements géographiques particuliers à l'intérieur et à l'extérieur du site. La continuité géographique est assurée par une couverture basée sur un maillage de capteurs. Ces capteurs, certains étant regroupés en stations (**figure 1**), sont spécifiques à chaque grandeur à monitorer. Ils enregistrent en continu la grandeur radioactive d'intérêt (débit de dose, activité bêta, gamma, alpha, etc.). Ces enregistrements constituent des séries temporelles dont les variations d'origine anthropique doivent être identifiées et monitorées pour anticiper et alerter en cas d'évolution pouvant impacter l'environnement ou l'humain. Ces séries temporelles sont soumises aux variations naturelles qu'il est important de différencier de celles d'origine anthropique. Il est aussi important de déceler toute tendance avant le dépassement de seuil d'alerte afin d'anticiper au mieux la correction à apporter pour limiter l'impact de l'événement. Enfin, afin de relier la grandeur surveillée à une quantification pour l'évaluation chiffrée de l'impact, cette série temporelle est exploitée pour extraire la partie utile du signal contenant l'évaluation recherchée.

Une série temporelle est constituée de la valeur remontée par le capteur en fonction du temps. Un coefficient peut convertir ce signal brut en unités plus appréhendables pour l'homme de l'art et la communauté traitant du sujet. La **figure 2** illustre une telle série obtenue sur le site de Valduc. Elle regroupe l'ensemble des phénomènes auxquels est confrontée l'analyse d'une telle série. Actuellement, cette analyse est réalisée par expertise si un seuil (fixé *a priori*) a été dépassé. À titre d'illustration du propos, nous donnons comme seuil d'alerte fixe la valeur de 115 nSv/h, représentée sur la **figure 2** par la ligne rouge horizontale. L'œil humain distingue aisément les phénomènes dépassant cette valeur cible, tels que (1), (2), (3). L'expert, par rapport à son



figure 1

Exemple de station de surveillance de l'environnement.

expérience et aux éléments de contexte dont il dispose, saura déterminer si le phénomène est critique ou non. Il distingue aussi la présence d'autres phénomènes en deçà du seuil, tels que (4), (5), (6), ainsi que des tendances de variations de la ligne de base du signal, telles que (7), (8), de durée plus ou moins longue en plus du bruit propre perturbant le signal. Toutefois, il n'est pas en capacité de suivre en continu toutes les séries temporelles remontées par l'ensemble des capteurs déployés. Le besoin est donc de rechercher dans la série temporelle, de façon automatisée et en dynamique, le phénomène appelant une expertise et de le signaler à l'expert. Il peut s'agir d'un dépassement de seuil avéré, mais aussi d'une dérive qui conduira potentiellement à un dépassement de seuil, une perte de signal suite à une défaillance du capteur ou, au contraire, à une défaillance électronique générant des phénomènes parasites. En creux, il s'agit aussi de différencier les phénomènes naturels ne nécessitant pas d'expertise particulière.

La réponse proposée est de détecter les phénomènes puis de les classer à l'aide des outils d'intelligence artificielle présents dans l'état de l'art **1**. Ces travaux sont menés à Valduc en collaboration avec le laboratoire L2S de l'école CentraleSupélec. La **figure 3** présente le travail réalisé sur une série temporelle de plusieurs mois. La **figure 3a** présente la série temporelle avec son marquage des phénomènes identifiés automatiquement (on parle alors de motifs) et la **figure 3b** présente la classification en cinq classes des 300 motifs extraits **2**. Il est alors possible à l'expert de « labelliser » chaque classe afin, par exemple, d'indiquer au programme de surveillance s'il s'agit d'un phénomène critique ou non. Ainsi, le programme saura à l'avenir comment traiter, selon le label attribué (critique, non critique, nouveau,

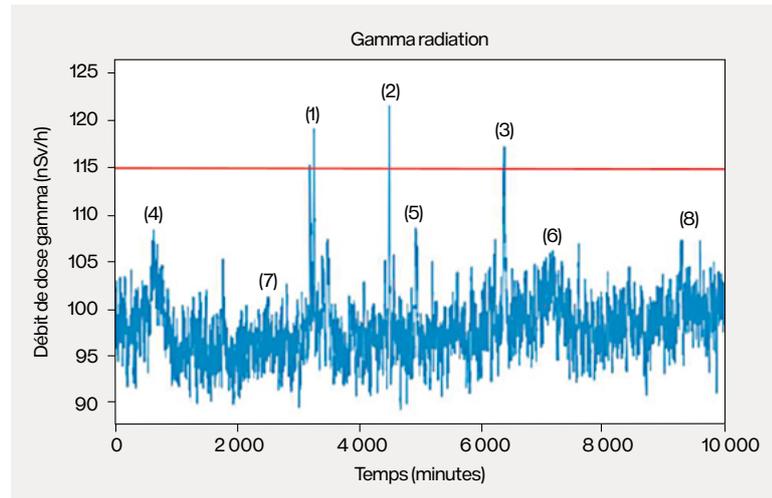


figure 2

Exemple de série temporelle relevée par un capteur. Les repères (1), (2) et (3) signalent des événements avec un dépassement de seuil (ligne rouge) tandis que les repères (4), (5) et (6) signalent des événements sans dépassement de seuil et que les repères (7) et (8) signalent des variations exogènes aux phénomènes d'intérêt.

etc.), les signaux placés automatiquement dans les classes. L'implantation en dynamique a prouvé que ces étapes sont réalisables en même temps que la mesure en continu relevée par le capteur et que les temps de traitement associés n'impactent pas la réactivité vis-à-vis de l'alerte.

Cette première étape franchie ouvre l'inspection d'outils complémentaires d'intelligence artificielle pour réaliser une métrologie dynamique du signal au plus proche des perturbations exogènes présentes au moment de la détection du phénomène et ainsi contribuer grandement à la réduction des incertitudes associées à ces quantifications.

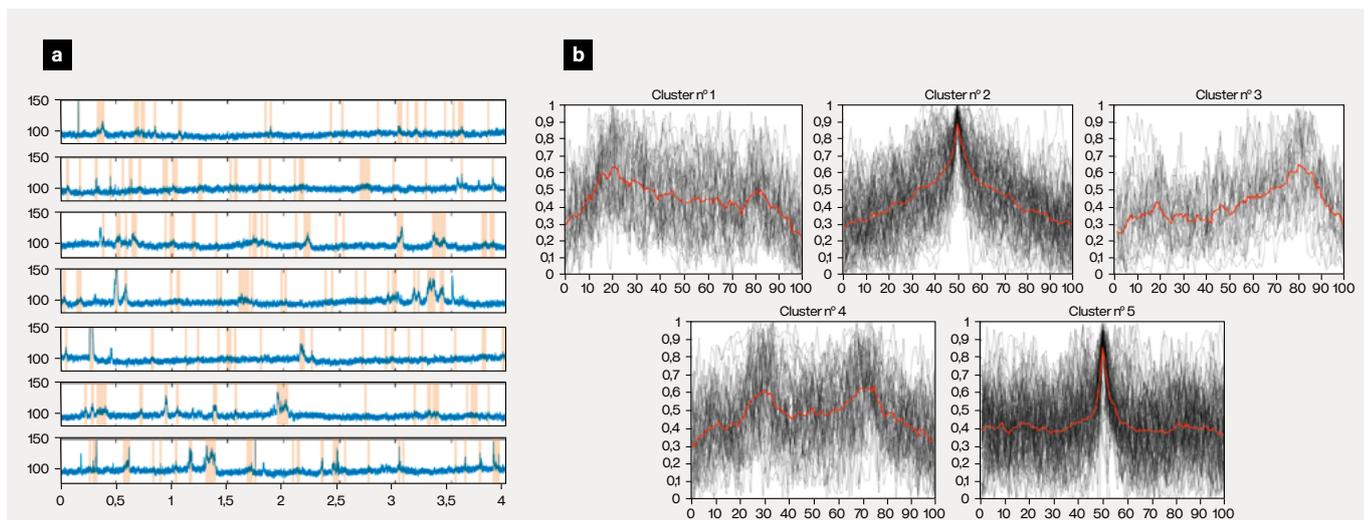


figure 3

Exemple de traitement d'une série temporelle d'une durée de sept mois avec une acquisition par minute. **a** Le nombre de motifs extraits par l'algorithme est de 300. **b** Le classement de ces motifs par classe a conduit à cinq classes regroupant les motifs identiques. Ces motifs sont d'amplitudes et de durées différentes. Pour faciliter la visualisation, ces deux caractéristiques ont été normalisées.

RÉFÉRENCES

1 F. K.-D. NOERING, Y. SCHROEDER, K. JONAS, F. KLAWONN, « Pattern discovery in time series using autoencoder in comparison to nonlearning approaches », *Integrated Computer-Aided Engineering*, **28**, p. 237-256 (2021). **2** L. POIRIER-HERBECK, E. LAHALLE, N. SAUREL, S. MARCOS, « Unknown-length motif discovery methods in environmental monitoring time series », *Proc. of the International Conference on electrical, computer and energy technologies*, Prague, République tchèque, 20-22 juillet 2022, IEEE Xplore, in press (2022).

Étalonnage sur site des systèmes de mesure infrasonore



S. K. Kristoffersen

A. Le Pichon

S. Denis

CEA - DAM,
centre DAM Île-de-France

M. Schwardt

BGR-B4.3 Hanovre, Allemagne

B. Alcoverro

CEA - DAM, centre du Cesta

Dans le cadre de la mise en œuvre du Système de surveillance internationale pour la vérification du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires, il est important de disposer de mesures infrasonores calibrées. La réponse instrumentale du système de mesure composée d'un microbaromètre et de son système de réduction du bruit peut être mesurée sur site en exploitant le bruit ambiant cohérent. Les effets des défauts des instruments de mesure sur la réponse fréquentielle des capteurs, en phase et amplitude, sont modélisés et comparés aux résultats d'une campagne expérimentale. De bons accords sont obtenus.

Le Système de surveillance internationale (SSI) a été mis en place pour vérifier, sur le plan mondial, l'application du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Tice). Ce système est équipé des technologies sismique, hydroacoustique, radionucléide et infrasonore. Il a été dimensionné afin de pouvoir détecter une explosion atmosphérique d'au moins 1 kt équivalent TNT en tout point du globe.

Afin de réduire le bruit généré par le vent, des systèmes de filtrage acoustique sont utilisés. Il s'agit de tuyaux fermés reliés aux capteurs avec, à leur extrémité, une prise d'air constituée d'une crépine métallique. En échantillonnant la pression sur une étendue grande devant la taille de la turbulence atmosphérique, mais faible devant la longueur d'onde du signal d'intérêt, le rapport signal à bruit peut être amélioré. Cependant, s'il y a des défauts du système de filtrage, par exemple des obstructions des prises d'air ou tuyaux remplis d'eau, le signal peut être affecté. Ces perturbations peuvent induire des erreurs de localisation de la source à l'origine du signal. Il est important de pouvoir mesurer et modéliser ces défauts.

La méthode de Gabrielson **1** est utilisée pour réaliser un système d'étalonnage sur site. Cette méthode compare la réponse en fréquence de deux capteurs (**figure 1**), un connecté au système de filtrage et un capteur de référence branché à un court tuyau. Comme la réponse du capteur de référence est connue, grâce à un étalonnage en laboratoire, il est possible de calculer la réponse du système de mesure testé avec son filtre acoustique.

figure 1

Deux microbaromètres placés dans des caissons hermétiques. Le cercle rouge indique le capteur testé connecté au système de filtrage. Le cercle vert indique le capteur de référence.



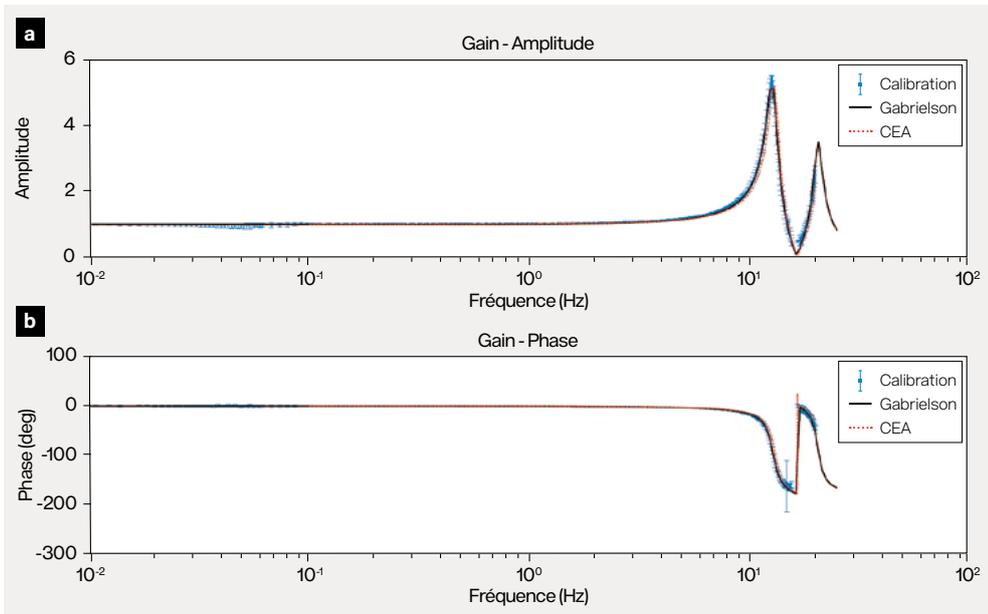


figure 2
Réponse d'un système de filtrage de 18 m de diamètre **a** en amplitude et **b** en phase incluant des incertitudes. La courbe noire correspond au modèle développé par Gabrielson, la courbe rouge à celui développé par le CEA.

La **figure 2** montre la réponse en amplitude et en phase avec des incertitudes, superposée aux modèles. La réponse est plate en amplitude et la phase nulle jusqu'à 8 Hz environ, et le système de filtrage ne perturbe pas la mesure des signaux. Les réponses modélisées sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. On note des résonances acoustiques dont les fréquences (à 12 Hz et 20 Hz) s'expliquent par la géométrie du système du filtrage, en particulier par la longueur des tuyaux.

Pour simuler les effets des défauts d'un système de filtrage, par exemple à la suite d'une inondation, huit entrées sur 32 ont été bouchées. Les résultats de l'étalonnage sont illustrés sur la **figure 3**. Une résonance apparaît cette fois entre 2 et 3 Hz, en plus des résonances déjà citées. Celle-ci se situe dans la bande de fréquence d'intérêt. Cette résonance perturbe la réponse en phase, avec une différence atteignant 100°. Cette perturbation

introduit des biais et incertitudes importants dans les mesures du vecteur d'onde (direction d'arrivée et vitesse horizontale) sur une antenne de capteurs. Les courbes colorées montrent les résultats des modèles. Comme le système de mesure n'est plus isotrope, sa réponse doit être calculée dans toutes les directions. Les comparaisons montrent l'apport de la modélisation pour évaluer les effets des défauts instrumentaux sur les mesures d'intérêt.

La prochaine étape est de réaliser cette expérience sur une station du SSI, afin de comparer la vitesse et l'azimut d'un signal réel, estimé avec un algorithme de détection, avec les modélisations. Cette expérience permettra d'élaborer une procédure d'étalonnage sur site d'une station infrasonore pour identifier en continu un dysfonctionnement instrumental. Un objectif à terme est de corriger les mesures à partir de la connaissance de la réponse des instruments.

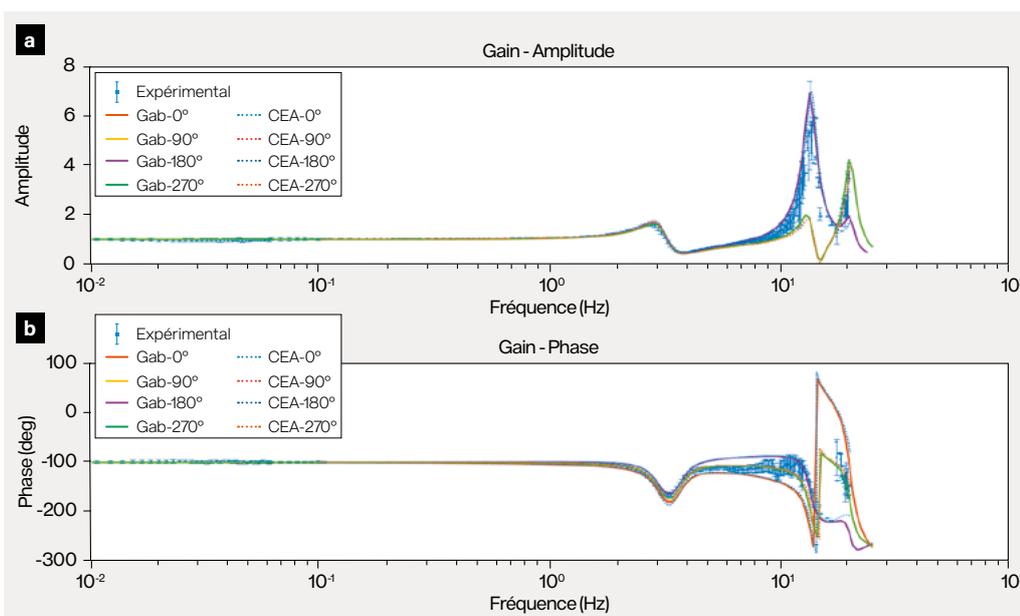


figure 3
Réponse du système de filtrage avec huit entrées bouchées **a** en amplitude et **b** en phase. Les modèles de Gabrielson et du CEA sont comparés dans quatre directions d'arrivée différentes.

RÉFÉRENCES

1 T. GABRIELSON, « *In situ* calibration of atmospheric-infrasound sensors including the effects of wind-noise-reduction pipe systems », *The Journal of the Acoustical Society of America*, **130**, p. 1154-1163 (2011).

Détecteur à fibre optique du débit de dose des installations d'irradiation



J. Vidalot
P. Paillet
CEA - DAM Île-de-France

A. Morana
S. Girard
Laboratoire Hubert-Curien,
UMR 5516 CNRS - Université
Jean-Monnet, Saint-Étienne

L'utilisation de machines d'irradiation est indispensable à l'étude de la vulnérabilité et à la qualification de composants ou systèmes électroniques et optoélectroniques opérant en environnement radiatif. La pertinence des résultats est liée à la maîtrise des caractéristiques des faisceaux d'irradiation telles que leur géométrie, leur homogénéité, leur flux ou leur spectre énergétique. Le suivi de ces caractéristiques n'est pas toujours disponible pendant l'expérimentation (*in situ*) faute d'instrumentation adaptée à un fonctionnement en environnement aussi extrême. Les travaux récents portent sur l'amélioration de la précision de mesure de certains accélérateurs et sur le développement de nouveaux diagnostics dosimétriques autour de générateurs pulsés de rayonnement X ou électronique.

Les installations d'irradiation du CEA - DAM couvrent un spectre large, depuis les sources de neutrons rapides jusqu'aux machines d'irradiation pulsée. Des dispositifs de mesure des radiations sont incontournables pour quantifier et qualifier avec précision et reproductibilité les niveaux d'exposition. Dans ce contexte, les technologies à base de fibres optiques sont devenues compétitives avec les meilleures solutions existant dans ce domaine **1**. Elles permettent maintenant d'imaginer des solutions innovantes pour l'étude de caractérisation temporelle et spatiale de faisceaux : certaines fibres optiques ou certains capteurs à fibres optiques voient leurs propriétés (atténuation, luminescence, diffusion) évoluer sous irradiation en fonction du type de particules tout en étant insensibles aux perturbations électromagnétiques. Elles deviennent crédibles pour développer des moyens *in situ* de caractérisation des faisceaux continus ou pulsés de photons, de neutrons ou d'électrons.

Sous irradiation, la dose ionisante dégrade la structure de la fibre optique et en modifie la transmission en absorbant la lumière transmise. Cette absorption augmente continuellement avec la dose et porte le nom d'atténuation induite par radiation. En incorporant du fluor dans les fibres, cet effet peut être fortement limité, les rendant utilisables pour le transport d'information en environnement radiatif. À l'inverse, l'incorporation de phosphore dans le cœur de la fibre la rend extrêmement sensible à la dose. Ce type de fibre est aujourd'hui évalué au Cern pour la dosimétrie de dose lors des expérimentations sur le LHC (Large Hadron Collider).

Un deuxième mécanisme apparaissant sous irradiation peut être mis à profit à des fins de dosimétrie : l'émission de lumière par génération de photons dans la section spécifiquement dopée de la fibre optique. Cette radioluminescence prend place lors d'une transition radiative d'électrons piégés dans un ou plusieurs états induits par le dopant dans la bande interdite de la silice amorphe. Cette luminescence, nommée émission induite par radiation (RIE), dépend du flux de particules (débit de dose).

Ce type de fibre dopée à l'azote a été évalué sur trois installations produisant des rayons X à des débits de dose croissants. Pour une source de rayons X continue, la mesure de radioluminescence, en bleu sur la **figure 1a**, est linéaire jusqu'à 15 Gy(SiO₂)/s. Cette

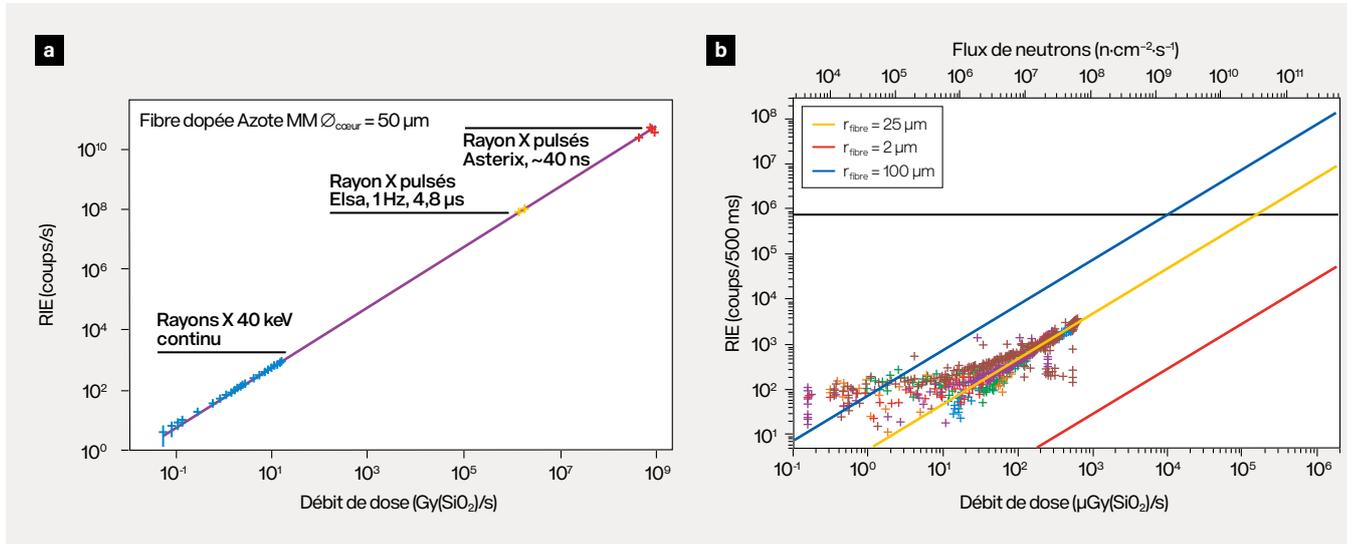


figure 1

a Émission induite par radiation (RIE) de la fibre dopée à l'azote irradiée par des rayons X issus d'une source de flash X d'une durée de 4,8 μ s et d'une source de flash X d'une durée approximative de 40 ns. **b** Émission induite par radiation produite par la fibre dopée à l'azote en fonction du flux de neutrons (débit de dose correspondant) pour trois rayons de fibre.

fibre a ensuite été irradiée par deux sources de rayons X produisant des impulsions courtes (4,8 μ s sur l'accélérateur Elsa au centre DAM Île-de-France) et ultracourtes (40 ns sur Asterix au centre de Gramat) permettant d'atteindre des débits de dose jusqu'au GGy(SiO₂)/s. La [figure 1a](#) montre (en rose) que la RIE produite varie linéairement avec le débit de dose sur toute la gamme explorée. L'écart à la linéarité est inférieur à 30 % sur plus de onze décades en débit de dose [2](#).

Des mesures de flux de neutrons de 14 MeV ont également été réalisées dans la même fibre dopée à l'azote. La [figure 1b](#) montre que la RIE induite garde un comportement linéaire pour des flux compris entre $5,5 \cdot 10^5 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ jusqu'à $3,5 \cdot 10^7 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Le dépôt d'énergie des neutrons de 14 MeV dans une fibre, étudié par simulation numérique, reste équivalent pour des diamètres entre 4 et 200 μ m. La RIE

obtenue dans ces deux cas extrêmes a été extrapolée sur la [figure 1b](#). Ainsi, le diamètre sensible du capteur peut être optimisé pour détecter des flux de neutrons depuis quelque $10^4 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ jusqu'à plus de $10^{12} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Ces résultats montrent que l'utilisation du principe d'émission induite par radiation dans des fibres optiques permet une dosimétrie et une instrumentation de faisceau pour la mesure *in situ* de débit de dose (flux de particules) sur une dynamique extraordinaire se plaçant parmi les meilleures solutions existant aujourd'hui. Ce type de détecteur sera prochainement optimisé pour discriminer les différents types de particules dans un environnement donné, en fonction du dopant utilisé et de sa réponse à chaque type d'interaction. Chaque type de détecteur sera étudié afin de déterminer son domaine d'utilisation optimale (sensibilité, linéarité, discrimination).

RÉFÉRENCES

- 1** S. GIRARD, J. KUHNHENN, A. GUSAROV, B. BRICHARD, M. VAN UFFELLEN, Y. OUERDANE, A. BOUKENTER, C. MARCANDELLA, « Radiation effects on silica-based optical fibers: Recent advances and future challenges », *IEEE TNS*, 60, p. 2015-2036 (2012). **2** J. VIDALOT, C. CAMPANELLA, J. DACHICOURT, C. MARCANDELLA, O. DUHAMEL, A. MORANA, D. POUJOLS, G. ASSAILLIT, M. GAILLARDIN, A. BOUKENTER, Y. OUERDANE, S. GIRARD, P. PAILLET, « Monitoring of ultra-high dose rate pulsed X-ray facilities with radioluminescent nitrogen-doped optical fiber », *MDPI Sensors*, 22 (2022).

Endommagement des 7 000 optiques du Laser Mégajoule



G. Hallo
F. Gaudfrin
C. Lacombe
V. Beau
J. Neauport

CEA – DAM, centre du Cesta

F. Hild

Laboratoire de mécanique
Paris-Saclay (LMPS),
UMR 9026 CNRS –
Université Paris-Saclay –
CentraleSupélec –
ENS Paris-Saclay

Installation phare du programme Simulation du CEA – DAM, le Laser Mégajoule est destiné à réaliser des expériences de haute densité d'énergie à des températures et des pressions représentatives du fonctionnement nucléaire des armes **1**. Au total 176 faisceaux laser, dimensionnés pour fournir 1,3 MJ sur une cible, parcourent près d'une centaine de kilomètres à travers plus de 7 000 grands composants optiques. Les énergies laser engagées sont susceptibles d'endommager ces optiques, augmentant ainsi le coût d'exploitation et réduisant ses performances. Le CEA cherche donc à maîtriser l'évolution des endommagements de ces optiques en associant des techniques d'analyse innovantes à diverses méthodes d'imagerie.

Les grandes optiques du Laser Mégajoule (LMJ) sont des composants aux fonctions optiques variées : miroirs, lentilles, cristaux de conversion de fréquence, hublots, réseaux, etc. Selon leur orientation par rapport à l'incidence du laser, elles mesurent entre 40 et 80 cm de côté. Lors de son passage, le laser peut entraîner la formation de dommages de quelques dizaines de microns. Une fois amorcés, les dommages croissent à chaque réexposition au laser. Répartis longitudinalement sur près de 100 km et spatialement sur 1 000 m² de surface optique, la détection et le suivi de ces dommages sont un enjeu majeur pour prévoir au juste besoin l'approvisionnement de nouvelles optiques ou leur restauration. Pour cela, le CEA a développé des moyens d'observation de l'endommagement des grandes optiques sur l'installation LMJ et y associe des outils d'analyse automatique. Les moyens d'observation reposent sur trois méthodes d'imagerie. Limités en précision par les contraintes d'une telle installation, ces moyens d'observation sont complétés par des bancs de métrologie plus résolus en base arrière, utiles à la validation des méthodes mises en œuvre.

La première méthode est une mesure par diffusion. Les optiques sont éclairées par des LED positionnées sur la tranche. Les dommages, présents en surface, diffusent une partie de la lumière d'éclairage. Une caméra image l'optique ainsi éclairée, les dommages apparaissent comme des points brillants sur une image à fond noir (**figure 1**). Cette méthode est utilisée pour deux des dernières optiques traversées par le laser à 351 nm et dont le suivi est primordial. La caméra d'observation est positionnée au centre de la chambre d'expériences et, par le biais de séquences machines automatiques, image chacune des 352 optiques concernées à une distance d'environ 8 m. Pour dépasser la limite imposée par la dimension d'un pixel sur les images (100 µm), la taille des dommages est estimée à partir des intensités mesurées, étalonnée grâce à un composant optique spécifique composé d'une matrice de plus de 900 dommages.

La deuxième méthode est une mesure par strioscopie. Elle consiste à extraire du faisceau d'éclairage les hautes fréquences spatiales, caractéristiques des dommages, par un filtrage dans un plan de focalisation du faisceau, en scannant longitudinalement différents plans optiques (**figure 1a**). Ce mode de mesure est uniquement possible pour les optiques de la section amplificatrice, équipée d'un système de filtrage et masquage adapté. Le traitement actuel de localisation de l'optique endommagée se base sur une évaluation du plan de meilleur focus sur les éléments détectés. Fournissant une localisation longitudinale

de l'ordre de 2 m, de nouveaux traitements 3D visent à calculer le plan de l'optique à partir des modifications des formes de l'endommagement sur l'ensemble de la séquence d'images acquise.

La troisième méthode est une mesure par diffraction. L'onde plane du faisceau d'éclairage qui traverse les optiques interfère avec les ondes sphériques générées par les dommages. Les images d'interférences sont acquises par une caméra. Des algorithmes de propagation d'ondes, en cours de développement, visent à estimer le défaut de phase et la taille de l'objet à partir des figures d'interférence (figure 1b). Cette méthode de mesure peut être utilisée pour de nombreuses optiques du LMJ dans les sections amplificatrice et transport et conversion de fréquences. L'efficacité de cette technique a récemment été démontrée avec la localisation d'un dommage sur un miroir de transport. Pour valider ces algorithmes, les optiques extraites de

l'installation pour maintenance sont finement observées sur les bancs de métrologie, complétant les essais réalisés en laboratoire.

Pour suivre efficacement la croissance des dommages tir après tir, un algorithme basé sur les principes de la corrélation d'images numériques [2] corrige les perturbations affectant les images (déplacements de la caméra, variations d'intensité de l'éclairage). Le CEA prévoit de généraliser cette méthode mise en œuvre sur les images de diffusion.

Malgré des images peu résolues spatialement et fortement perturbées, les travaux menés par le CEA sur le suivi de l'endommagement des optiques du LMJ devraient permettre à terme d'optimiser les maintenances et approvisionnements d'optiques neuves. L'exploitation du LMJ serait alors facilitée tout en garantissant les performances laser indispensables à la réussite des expériences de fusion du programme Simulation.

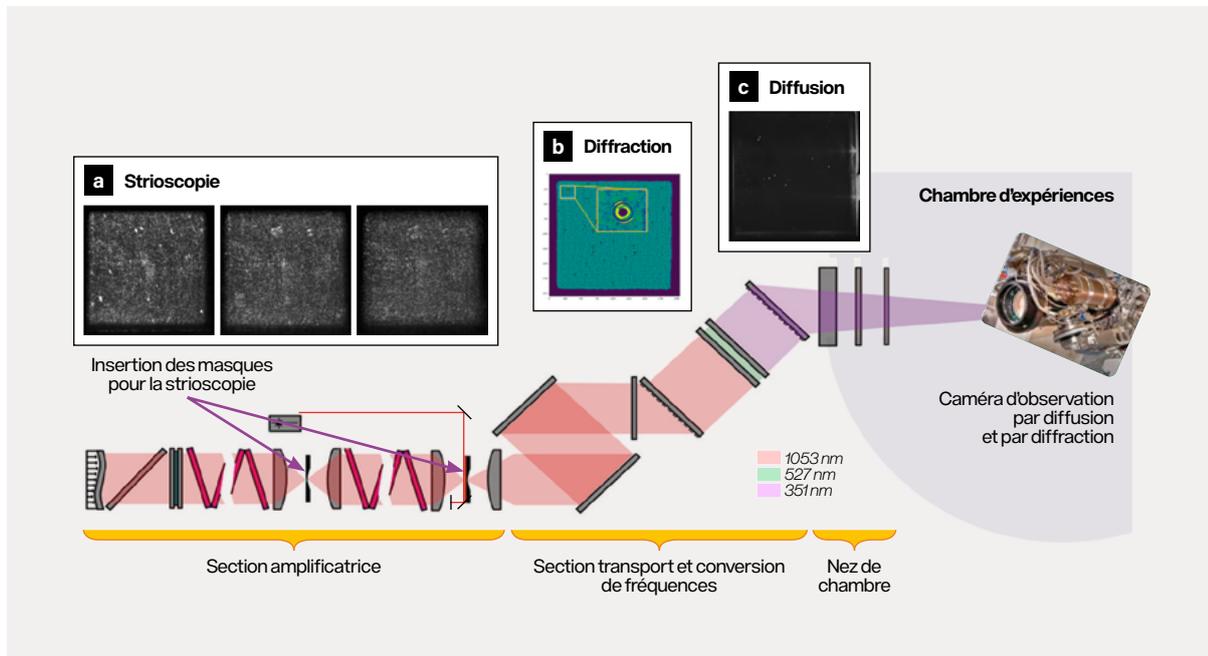


figure 1

Représentation schématique des différentes sections traversées par un faisceau laser du Laser Mégajoule. Exemples d'images obtenues par a) la mesure en mode strioscopie, b) la mesure de diffraction avec un zoom sur une figure de diffraction et c) la mesure de diffusion.

RÉFÉRENCES

- [1] J.-L. MIQUEL, E. PRENÉ, « LMJ & PETAL status and program overview », *Nucl. Fusion*, **59**, 032005 (2019). [2] G. HALLO, C. LACOMBE, R. PARREAULT *et al.*, « Sub-pixel detection of laser-induced damage and its growth on fused silica optics using registration residuals », *Optics Express*, **29**, p. 35820-35836 (2021).

Méetrologie des caméras à balayage de fente X du Laser Mégajoule



T. Chirac
L. Rémy
CEA - DAM,
centre DAM Île-de-France

Sur le Laser Mégajoule (LMJ), des systèmes de détection appelés diagnostics plasma sont utilisés pour mesurer le rayonnement émis par un plasma, dans le but de tester et valider des modèles théoriques. Deux familles de diagnostics plasma sensibles à la gamme X utilisent actuellement des caméras à balayage de fente : ce sont des imageurs et des spectromètres. Les caméras à balayage de fente sont des instruments qui permettent de suivre l'évolution temporelle selon une dimension spatiale d'une source lumineuse, avec une résolution temporelle inférieure à la dizaine de picosecondes. Leur principe de fonctionnement et un exemple d'acquisition sont respectivement présentés sur les **figures 1 et 2**. L'exploitation des enregistrements est conditionnée par une caractérisation amont rigoureuse des performances intrinsèques de l'appareil.

Pour garantir des mesures justes et interprétables sur toute la durée des campagnes expérimentales, il est nécessaire de réaliser des caractérisations périodiques des performances des caméras à balayage de fente. À cette fin, une optimisation des méthodes d'acquisition, de traitement et d'historisation des données d'étalonnage a été mise en place et a ainsi permis d'améliorer la mesure.

L'élément principal d'une caméra à balayage de fente est son tube cathodique, intégrant des électrodes soumises à des hautes tensions électriques. Les valeurs des potentiels électriques à appliquer sur chacune des électrodes sont cruciales pour assurer une bonne focalisation du faisceau électronique et restituer un signal fidèle au phénomène à observer ; il s'agit du principal axe d'optimisation. L'image électronique est ensuite déviée dynamiquement au sein du tube à l'aide de plaques de déflection. Ce sont les rampes de tension appliquées aux plaques qui conditionnent principalement la résolution temporelle de la caméra à balayage de fente. C'est le second axe d'optimisation.

Pour influencer sur le premier axe d'optimisation, lors de la phase de qualification du tube, les images obtenues en fonction des potentiels appliqués aux électrodes sont acquises de façon automatisée, de manière à rendre la mesure plus répétable. D'autre part, un programme d'analyse a été codé de manière à sélectionner le meilleur point de fonctionnement de manière objective, selon des critères bien définis en amont. Ces critères portent sur la résolution spatiale, la fonction d'élargissement de ligne (FEL) dans le sens temporel, et sur la transmission électronique du tube.

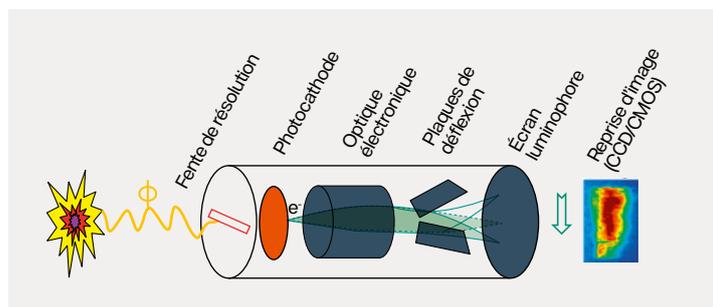


figure 1
Principe d'une
caméra à balayage
de fente.

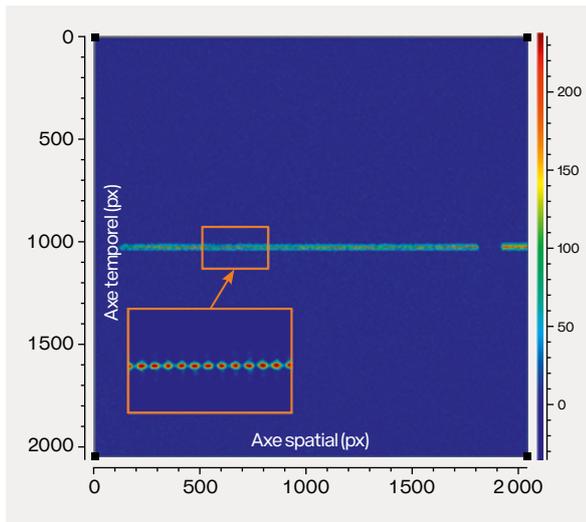

figure 2

Image d'une mire d'or de pas 100 µm placée sur la fente d'entrée d'un tube bilamellaire, vue à travers le tube au voisinage de son point de fonctionnement optimal (1 px = 13,5 µm).

La résolution spatiale est définie pour deux objets séparés d'une distance notée *res* sur la fente d'entrée du tube. On considère que les objets sont résolus si un contraste d'au moins 50 % est observé. Le contraste est défini comme étant, à bruit de fond nul, le rapport

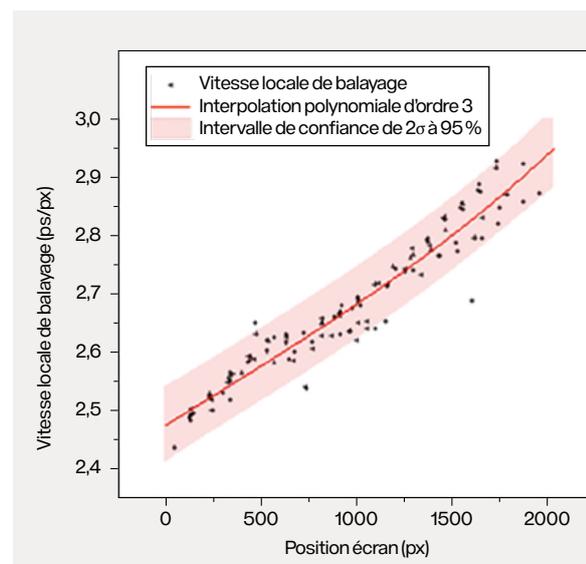
$$\frac{|signal\ max - signal\ min|}{|signal\ max + signal\ min|}$$

Parallèlement à cela, la focalisation de la fente de 200 µm de large donne lieu à une trace d'une certaine épaisseur dans le sens temporel de l'écran. La largeur à mi-hauteur de cette trace est ce que l'on appelle sa fonction d'élargissement de ligne (FEL). Plus la FEL est petite, meilleure est la résolution temporelle, car lors du balayage de la trace, le recouvrement des signaux émis en différents instants est moindre. Le troisième et dernier critère de notre qualification concerne le niveau de signal en sortie du tube : il est souhaitable de maximiser la collecte des photoélectrons pour obtenir le meilleur rapport signal à bruit. Notre algorithme assigne une note globale à chaque jeu de tension, en évaluant la qualité du signal basé sur une pondération de ces trois critères, sur plusieurs zones de l'écran. En balayant différentes valeurs de potentiel pour chacune des électrodes, il retient le point de fonctionnement qui maximise la note, et donc qui offre le meilleur compromis entre les trois critères. Dans le cas de nos tubes, après optimisation du point de fonctionnement selon cette méthode, pour une conservation du contraste à au moins 50 %, on atteint une résolution spatiale $res = 50\ \mu\text{m}$. Ce résultat est mesuré valide le long de la fente sur une longueur de 15 mm, et pour toutes les déflexions du faisceau selon l'axe temporel, dans les limites de la taille de l'écran. La FEL est mesurée à 45 µm, correspondant à une résolution temporelle

de 15 ps dans le cas d'un balayage de l'écran de 28 mm en 10 ns. Mentionnons toutefois que d'autres phénomènes peuvent dégrader ces valeurs ; elles sont un majeur des performances optimales **1**.

En plus de l'optimisation du point de fonctionnement précédemment détaillée, une seconde amélioration dans la procédure de caractérisation de la caméra à balayage de fente concerne la mesure systématique de la reproductibilité de la déflexion électronique. En effet, la rampe de tension sur les plaques de déflexion appliquée par l'alimentation rapide, d'une part, n'est pas parfaitement linéaire et, d'autre part, peut légèrement varier d'une acquisition à l'autre. Ces mesures s'attachent donc à mesurer la vitesse locale moyenne sur la rampe et son écart-type. La rampe est raisonnablement approximée par un polynôme d'ordre 3, comme illustré sur la **figure 3**. Pour ce calibre, sans connaissance des rampes, la mesure était donnée globalement à $2,7 \pm 0,30\ \text{ps/pixel}$. Depuis notre mesure automatique, elle est donnée pour chaque position écran avec un intervalle de confiance à 2σ (95,45 %) de $\pm 0,07\ \text{ps/pixel}$. Les incertitudes sur la vitesse de balayage sont ainsi réduites à 2,5 % (au lieu de 11 %) grâce à l'automatisation et au traitement des données.

Toutes ces mesures sont méticuleusement enregistrées pour chaque analyseur optique de type caméras à balayage de fente X dans une base de données exploitée lors de l'analyse et du dépouillement des images acquises durant les tirs du Laser Mégajoule.


figure 3

Exemple de mesure de vitesse locale de balayage, ajustement polynomial et intervalle de confiance (1 px = 13,5 µm).

RÉFÉRENCES

- 1** I. LANGMUIR, « The effect of space charge and residual gases on thermionic currents in high vacuum », *Phys. Rev.*, **2**, p. 450-486 (1913).

Caractérisation dimensionnelle de pièces élémentaires par tomographie



A. Choux
N. Arluison
R. Béchir
A. Guinard
F. Lamy
CEA - DAM,
centre de Valduc

Le laboratoire de contrôle non destructif du centre CEA - DAM de Valduc caractérise différentes pièces élémentaires, avant utilisation, dans le but de garantir la conformité de leur fabrication. Le laboratoire conçoit et met en œuvre également des techniques de mesure par rayonnement X pour acquérir certaines dimensions de pièces élémentaires tels des tuyaux au design et à la géométrie complexes. Le laboratoire dispose d'un nouveau système de tomographie par rayons X permettant de caractériser entre autres ces tuyaux élaborés. Il doit garantir la fiabilité du contrôle que constituent les mesures réalisées pour pouvoir prononcer ou non la conformité de ces tuyaux.

Le procédé de caractérisation par tomographie permet d'accéder à des cotes habituellement non accessibles par des moyens de caractérisation plus classiques, comme la machine de mesure tridimensionnelle (MMT). Il se déroule habituellement en trois étapes : acquisition, reconstruction et analyse. De nombreux facteurs interviennent lors de cette caractérisation, tels que le facteur « opérateur », les paramètres d'acquisition, les paramètres de reconstruction, le modèle de relevé de mesure, etc. Tous ces facteurs influent sur les résultats de contrôle. Par définition, toute mesure n'est valable que si une incertitude de mesure lui est associée. Cette dernière est déterminée selon le référentiel international (GUM **1**). Ainsi toutes les erreurs et incertitudes, de type A ou B, doivent être prises en compte. Le procédé de mesure par tomographie est complexe. Par conséquent, les incertitudes de mesure sont déterminées à partir d'une campagne de mesure par répétabilité.

Ces mesures sont ensuite confrontées à un étalon (**figure 1**). Seule une partie des mesures réalisées par tomographie est comparée aux mesures relevées pour les cotes accessibles par contrôle dimensionnel classique. Cette validation permet de certifier les mesures réalisées par tomographie. Toutes les mesures obtenues par tomographie et par contrôle dimensionnel coïncident, aux incertitudes de mesure près.



figure 1

Volume reconstruit d'un étalon.

Un exemple des mesures réalisées sur des étalons et comparées à des mesures dimensionnelles est présenté dans le **tableau 1**. Les étalons possèdent des défauts calibrés de type trou cylindrique. La campagne de répétabilité a consisté à contrôler cinq fois les défauts calibrés en réalisant le processus de contrôle dans sa globalité. La moyenne et l'écart-type

pour chaque défaut sont calculés et comparés aux mesures dimensionnelles. Toutes les mesures obtenues par tomographie et par contrôle dimensionnel coïncident, aux incertitudes de mesures près.

L'étude globale a permis de définir les incertitudes de mesure indiquées dans le **tableau 2** pour les paramètres de contrôle demandés.

Mesure en µm	Défaut de 60 µm						Défaut de 80 µm						Défaut de 100 µm					
	D*	P*	D	P	D	P	D	P	D	P	D	P	D	P	D	P		
Épaisseur de l'étage étudié	200		400		600		200		400		600		200		400		600	
Mesures réelles A(1)	59	63	57	62	64	62	79	85	81	82	81	82	107	102	101	103	101	104
Moyenne A(1)	60	39	59	40	60	39	89	66	82	62	78	62	112	85	105	79	90	72
Écart-type A(1)	11	10	2	8	9	8	9	8	5	5	9	4	7	5	8	7	7	9
Épaisseur de l'étage étudié	300		500		700		300		500		700		300		500		700	
Mesures réelles B(2)	61	59	63	61	62	61	84	81	83	82	83	81	101	99	101	104	103	102
Moyenne B(2)	61	33	57	37	51	39	81	64	79	58	76	52	106	72	103	63	99	57
Écart-type B(2)	10	11	/	/	/	/	5	8	7	11	7	7	7	4	7	7	7	12
Épaisseur de l'étage étudié	250				500		250				500		250				500	
Mesures réelles C(3)	60	62			62	59	86	82			85	84	107	105			106	104
Moyenne C(3)	62	50			59	44	80	74			83	72	106	86			96	78
Écart-type C(3)	5	8			8	9	4	8			3	8	5	8			10	8
Épaisseur de l'étage étudié	150		650		950		150		650		950		150		650		950	
Mesures réelles D(4)	62	61	61	62	64	61	84	82	82	81	82	85	104	102	102	104	102	106
Moyenne D(4)	60	44	/	/	/	/	83	71	74	66	75	61	115	95	95	91	96	91
Écart-type D(4)	10	6	/	/	/	/	8	8	9	11	12	8	10	8	9	12	12	7
Épaisseur de l'étage étudié	250		750		1 050		250		750		1 050		250		750		1 050	
Mesures réelles E(5)	62	61	61	62	62	65	83	81	83	81	83	81	101	104	101	104	102	105
Moyenne E(5)	58	46	/	/	/	/	81	72	74	67	74	66	108	95	96	91	96	88
Écart-type E(5)	8	7	/	/	/	/	6	6	7	8	10	10	10	7	7	9	9	6

tableau 1

Résultats issus d'une campagne de répétabilité de mesure sur des étalons présentant des défauts calibrés.

	Incertitude type <i>U</i> _{répétabilité}	Incertitude élargie <i>U</i> _{répétabilité}
Nombre de soufflures > 40 µm	0,5	1,4
Mesure d'un défaut dans la soudure (µm)	3	8,3
Hauteur liaisonnée minimale (µm)	9	25
Mesure d'un défaut dans les étalons A(1) & B(2) (µm)	13	36,1
Mesure d'un défaut dans l'étalon C(3) (µm)	10	27,8
Mesure d'un défaut dans les étalons D(4) & E(5) (µm)	10	27,8

tableau 2

Incertainces de mesure issues de la campagne de répétabilité.

RÉFÉRENCES

1 JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM), *Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*, GUM 1995, p. 19-21 (2008).

Mesure de masse volumique de mousses de cuivre par tomographie X



A. Royer
R. Capiou
CEA – DAM,
centre de Valduc

Les cibles expérimentées sur le Laser Mégajoule possèdent des géométries variées et des tailles millimétriques. Elles mettent en œuvre des matériaux aux propriétés physiques très différentes (polymères, métaux) et sont réalisées dans le respect de spécifications dimensionnelles exigeantes. La caractérisation de ces matériaux tout au long des différentes étapes de fabrication permet de garantir la réussite des expériences. La santé matière des matériaux légers de type aérogel, possédant des masses volumiques de quelques centaines de milligrammes par centimètre cube, est caractérisée par leur porosité et leur masse volumique afin de choisir les zones optimales d'exploitation. Dans ce cadre, le centre CEA – DAM de Valduc possède un équipement de tomographie X pour le contrôle non destructif.

Pour les matériaux facilement manipulables en sortie de synthèse, la masse volumique est déterminée par mesure du volume en tomographie X et pesée avec une balance. Une méthodologie de détermination de la masse volumique par analyse des niveaux de gris des images tomographiques a été développée pour les matériaux les plus fragiles, de type mousse métallique (**figure 1**), afin d'éviter au maximum les manipulations. L'intensité des niveaux de gris est fonction de la dose de rayonnement reçue. Cette dose dépend notamment de la masse volumique du matériau suivant la loi de Beer-Lambert :

$$I = I_0 e^{-\mu \rho e},$$

où e est l'épaisseur traversée, ρ la masse volumique, μ le coefficient d'atténuation massique du matériau et I/I_0 l'intensité reçue rapportée à l'intensité incidente.

Des échantillons homogènes de différents matériaux ont été fabriqués, puis caractérisés en masse volumique, à $\pm 0,5 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ près (en utilisant la méthode traditionnelle de pesée-volumétrie), afin de servir de références. Ainsi, en traçant pour chacun de ces échantillons I/I_0 en fonction de la masse volumique, il est possible de construire une courbe d'étalonnage (**figure 2**) qui permet d'associer un niveau de gris, qui dépend de I/I_0 , à une

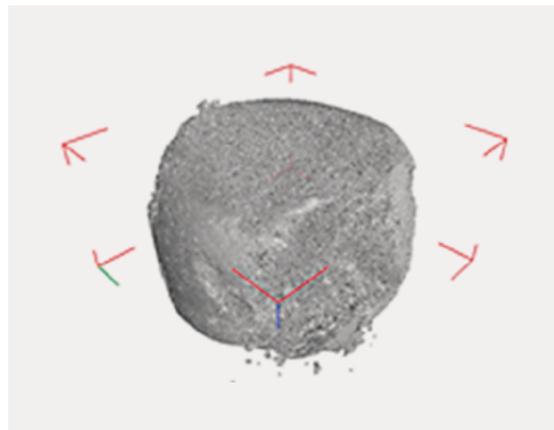


figure 1
Reconstruction 3D
d'une mousse
de cuivre par
tomographie X.

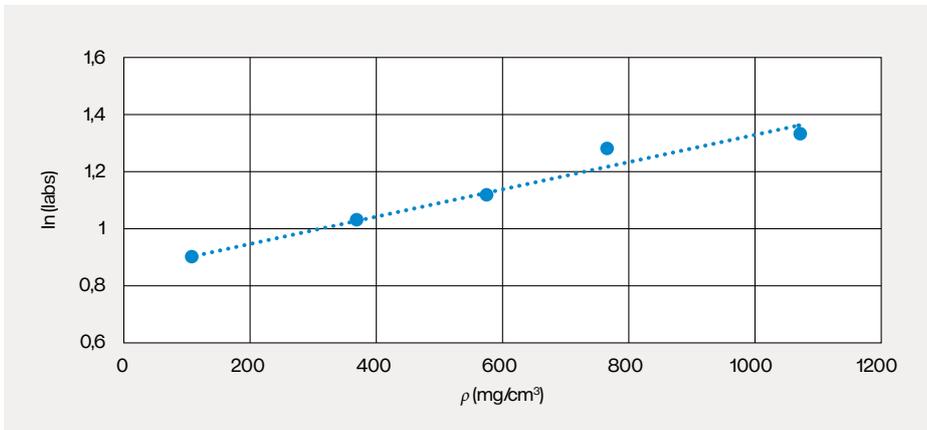


figure 2
 Courbe d'étalonnage de l'évolution suivant la loi de Beer-Lambert de l'absorption des rayons X en fonction de la masse volumique d'une mousse de cuivre.

valeur de masse volumique. Il est important toutefois de souligner que, comme les valeurs d'absorption dépendent des paramètres d'acquisition de l'équipement de tomographie, notamment de la tension d'accélération, ces courbes ne sont valables que pour des conditions d'acquisition données.

L'objectif est ensuite de quantifier les variations de masse volumique au sein d'un échantillon quelconque. Afin d'y parvenir, le logiciel de reconstruction 3D VGStudio Max 3.3© est utilisé pour modéliser les variations de niveaux de gris, et donc de la masse volumique, au sein de cet échantillon (**figure 3**) et en réalisant une représentation 3D avec une échelle de couleurs allant du bleu au rouge ; le bleu correspondant au niveau de gris le plus faible, donc à la masse volumique la plus faible, et le rouge au niveau de gris le plus fort.

En appliquant la loi obtenue précédemment aux valeurs de niveau de gris fournies par le logiciel, une valeur de masse volumique peut être obtenue pour chaque valeur de l'échelle de couleur, soit 300 mg·cm⁻³ pour le bleu, 1 500 mg·cm⁻³ pour le rouge.

Cette méthode de détermination de la masse volumique par mesure de niveaux de gris présente l'avantage de préserver l'intégrité de l'échantillon en limitant les manipulations, mais elle permet surtout de localiser et choisir les zones de l'échantillon possédant une masse volumique suffisamment homogène et de valeur adaptée pour la fabrication des éléments de cibles. À ce jour, l'incertitude sur la valeur de masse volumique déterminée pour ce type d'échantillons et dans ces conditions d'acquisition est évaluée à ± 10 %. Afin de ne plus dépendre des conditions d'acquisition des échantillons et obtenir des reconstructions 3D optimales pour toutes les valeurs de masse volumique, l'utilisation de la simulation numérique avec le logiciel Civa© est en

cours d'étude. L'objectif est de disposer de courbes d'étalonnage pour différents matériaux et conditions d'acquisition, en limitant le nombre d'échantillons de référence et de caractérisations associées.

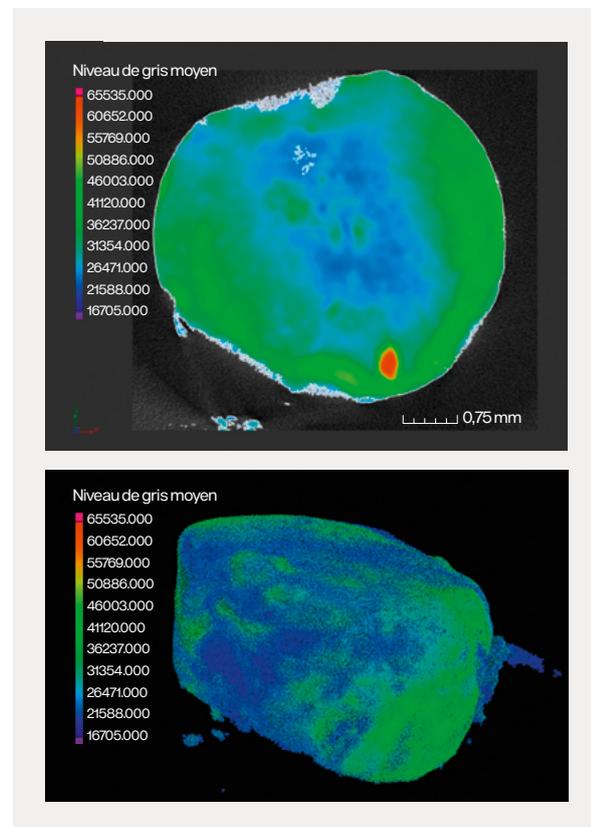


figure 3
 Représentation 3D de la distribution de la masse volumique au sein d'un échantillon de mousse de cuivre réalisée par tomographie X. L'échelle de couleur de niveaux de gris indique des valeurs de masse volumique s'étendant de 300 mg·cm⁻³ (bleu) à 1500 mg·cm⁻³ (rouge).

Imagerie laser d'une onde de souffle



D. Plouhinec
S. Maqueda
D. Capdeville
CEA – DAM,
centre de Gramat

L'étude dont il est question dans cet article a pour objectif la caractérisation d'une onde de souffle sphérique générée dans l'air par une explosion d'énergie équivalente à 1 g TNT, soit environ 5 kJ, qui se propage sur des distances caractéristiques de quelques unités à quelques dizaines de centimètres. Une cinématographie ultrarapide utilisant une technique d'imagerie de type ombroscopie laser couplée à un écran rétro réfléchissant permet de visualiser finement la propagation de l'onde de souffle. La sphéricité de l'onde de choc et son interaction avec l'environnement sont observées et l'analyse post-traitement des images (déplacement, vitesse) est comparée aux simulations numériques.

Dans le cadre de l'observation de phénomènes possédant d'importantes variations de gradient d'indice, la mise en œuvre d'un diagnostic optique de type ombroscopie, sensible à la dérivée seconde du gradient d'indice, est une technique d'imagerie 2D adaptée. Cette technique est fréquemment utilisée pour observer et mesurer les caractéristiques temporelles et spatiales d'une onde de choc consécutive à la détonation d'une charge explosive se propageant dans l'air. Les données d'entrée de l'observable (dimensions, temps, vitesse, luminosité) conditionnent le choix et les paramètres de la caméra ultrarapide à utiliser pour la visualisation du phénomène, ainsi que la technique de photographie à concevoir. La méthode d'observation proposée pour l'étude au centre CEA – DAM de Gramat repose sur un diagnostic d'imagerie appelée *Pure In Line Shadowgraphy* (PILS) **1**. Cette méthode utilise un écran rétro réfléchissant sur lequel est projetée l'ombre de la zone d'intérêt à l'aide d'un éclairage artificiel. Le choix s'est porté sur un éclairage par laser continu intense, d'une puissance de 6 W à la longueur d'onde de 532 nm, qui permet de minimiser les effets parasites liés à la luminosité intense générée par le plasma de l'explosion. L'écran rétro réfléchissant (référence Scotchlite 7610 de la marque 3M) présente un pouvoir de réflexion 900 fois supérieur à un écran diffus blanc. Cet écran est imagé par une caméra Phantom V2511. La dynamique de la caméra est de 12 bits et enregistre une cinquantaine d'images au format 256 × 256 pixels avec un temps d'exposition de 275 ns par image. Un miroir de diamètre 8 mm est collé sur l'objectif de focale 24-135 mm de la caméra pour l'injection de l'éclairage laser.

La conception d'un tel système optique requiert une première étape d'alignement dans laquelle la source laser, le miroir, le point source de l'onde et l'écran rétro réfléchissant sont

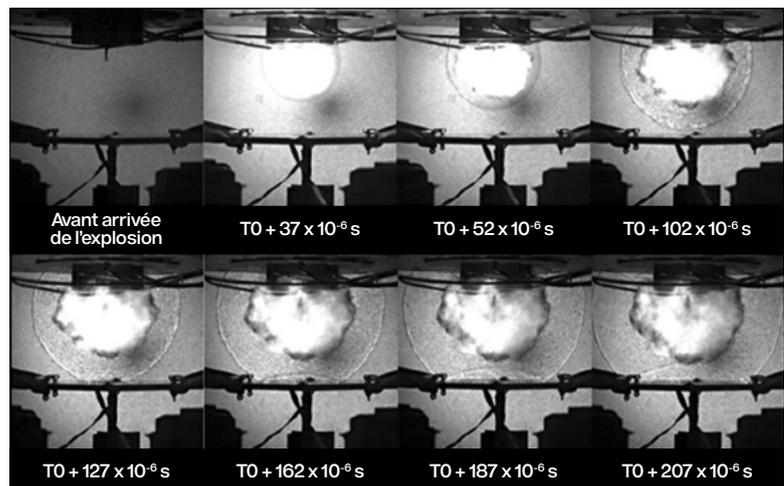


figure 1

Observation d'une onde de souffle se propageant dans l'air par la technique PILS.

parfaitement alignés. Cette étape permet de s'affranchir des phénomènes de distorsion et de corrections angulaires. Comme pour tout système de mesure, l'étalonnage est ensuite une étape indispensable. Cet étalonnage doit être réitéré dès qu'un paramètre du système optique varie. À titre d'exemple, la valeur moyenne d'un pixel est de 1,57 mm ± 0,2 mm pour le format 256 × 256 pixels de la caméra pour notre système optique. L'étalonnage, l'acquisition des images sur la **figure 1**, ainsi que le relevé des points aux différents instants entre le centre de l'explosion X₀ et le point de mesure du front d'onde X_i s'obtiennent avec le logiciel propriétaire de la caméra Phantom Camera Control. Ce protocole d'essai permet de tracer les profils temporels de distance radiale et de vitesse de propagation du front de l'onde de souffle qui se propage dans l'air. La répétabilité des essais permet de vérifier la bonne corrélation des résultats obtenus et de minimiser ainsi les erreurs liées à des dispersions inhérentes à l'expérience ou à des phénomènes physiques.

Le post-traitement des données issues de ces mesures d'ombroscopie permet de tracer l'évolution temporelle du rayon et de la vitesse du front d'onde pour ces expérimentations menées avec une explosion

d'énergie équivalente à 1 g de TNT environ. La **figure 2** présente les résultats préliminaires de comparaison de ces expérimentations avec un modèle analytique [2,3] et avec une simulation numérique menée avec un outil 1D de calcul fluide (code Ouranos, mis en œuvre dans le cadre des études de propagation et diffraction du souffle). Un travail complémentaire reste nécessaire pour analyser et quantifier les incertitudes des profils de rayon et de vitesse expérimentaux.

En conclusion, ces résultats préliminaires montrent que la technique d'ombroscopie laser permet d'obtenir des données essentielles à la caractérisation de ces expérimentations d'effet de souffle à échelle réduite. La mise au point de cette technique est en cours pour permettre une caractérisation plus poussée de l'onde de choc sphérique, de sa propagation et de son interaction avec des maquettes ainsi que pour analyser et quantifier les incertitudes des grandeurs issues de ces mesures d'ombroscopie. Les simulations numériques ainsi que des mesures de pression du front d'onde de choc viendront compléter ces travaux pour démontrer la représentativité et la reproductibilité de ces expériences de laboratoire vis-à-vis d'une explosion à l'échelle 1.

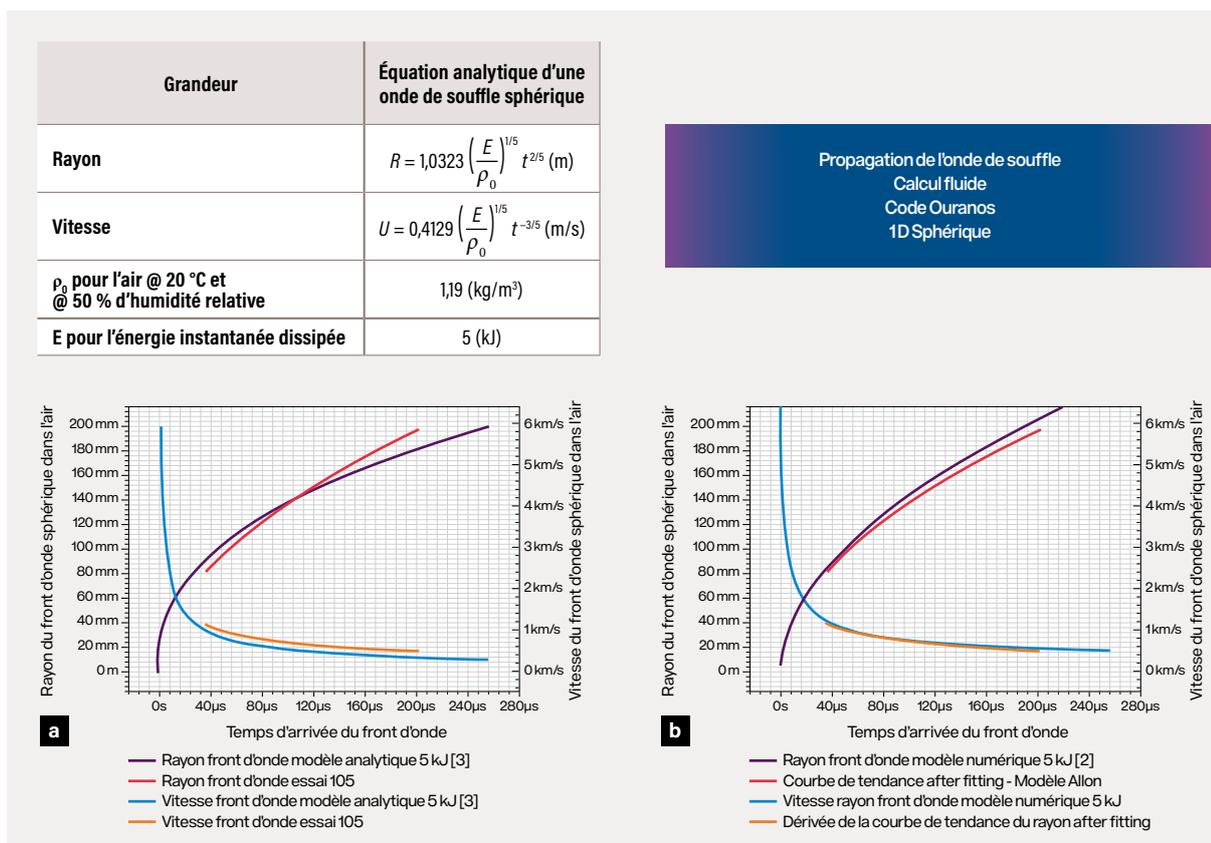


figure 2

Comparaison des résultats expérimentaux des profils de rayon et de vitesse du front d'onde avec **a**) un modèle analytique et **b**) une simulation numérique faite avec le code de calcul fluide Ouranos.

RÉFÉRENCES

1 G. S. SETTLES *et al.*, « Full-scale high-speed "Edgerton" retroreflective shadowgraphy of explosions and gunshots », *fifth Pacific Symposium on Flow Visualisation and Image Processing*, PSFVIP-5-251 (2005). **2** D. L. JONES, « The energy parameter B for strong blast waves », technical note 155, US National Bureau of Standards (1962). **3** G. F. KINNEY, K. J. GRAHAM, *Explosive Shocks in Air*, Book Second Edition, Springer, Table XI, p. 254 (1985).





N°08 / NOVEMBRE 2023

CHOCES FOCUS

Actualités scientifiques
à la Direction des
applications militaires



VIENT DE PARAÎTRE
REVUE *CHOCES* N° 53
Électronique

N°08 / NOVEMBRE 2023

CHOCES FOCUS

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES À LA DIRECTION
DES APPLICATIONS MILITAIRES



www-dam.cea.fr