

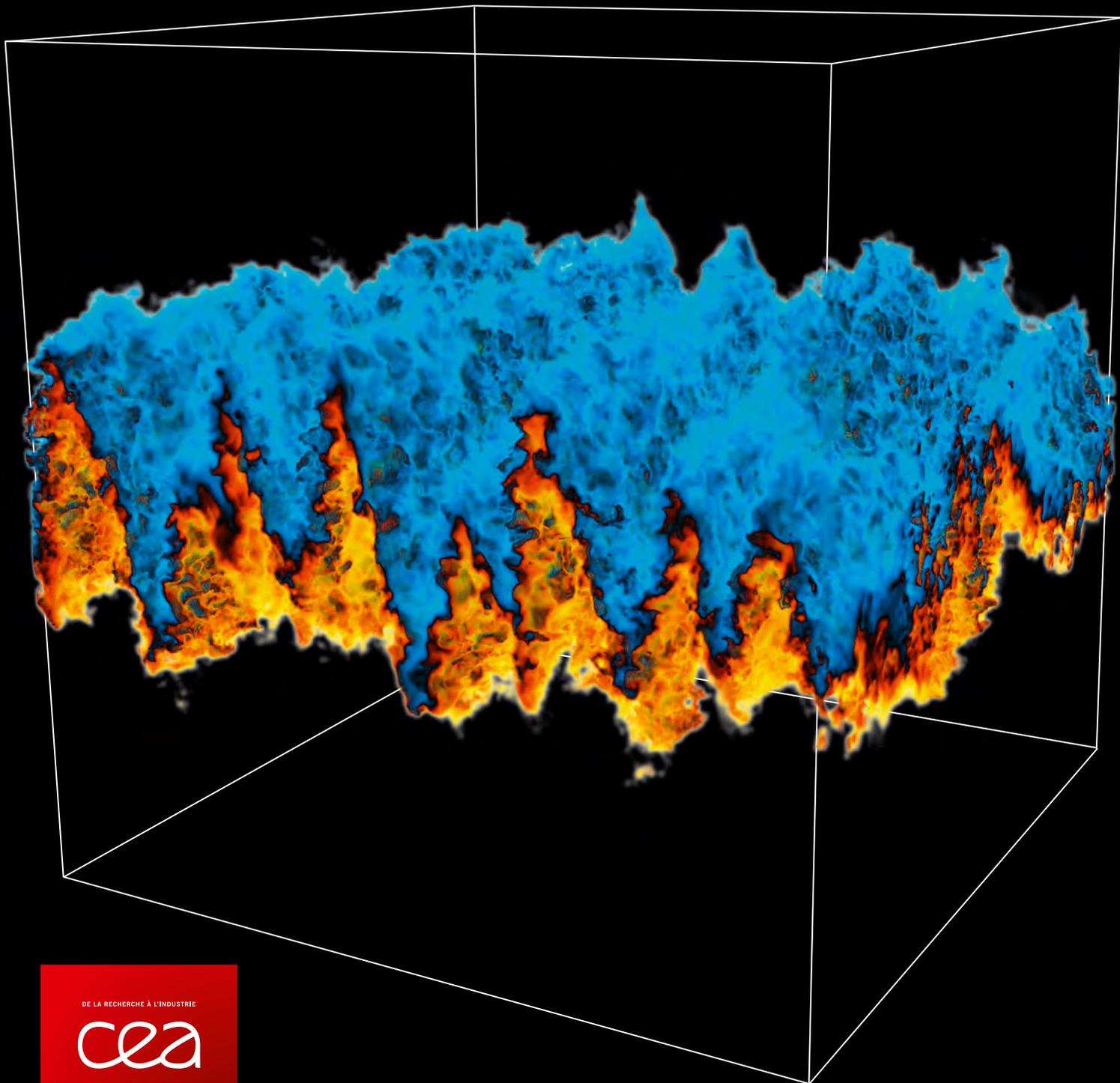
chocs

AVANCÉES

N° 14

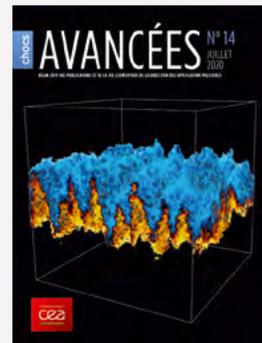
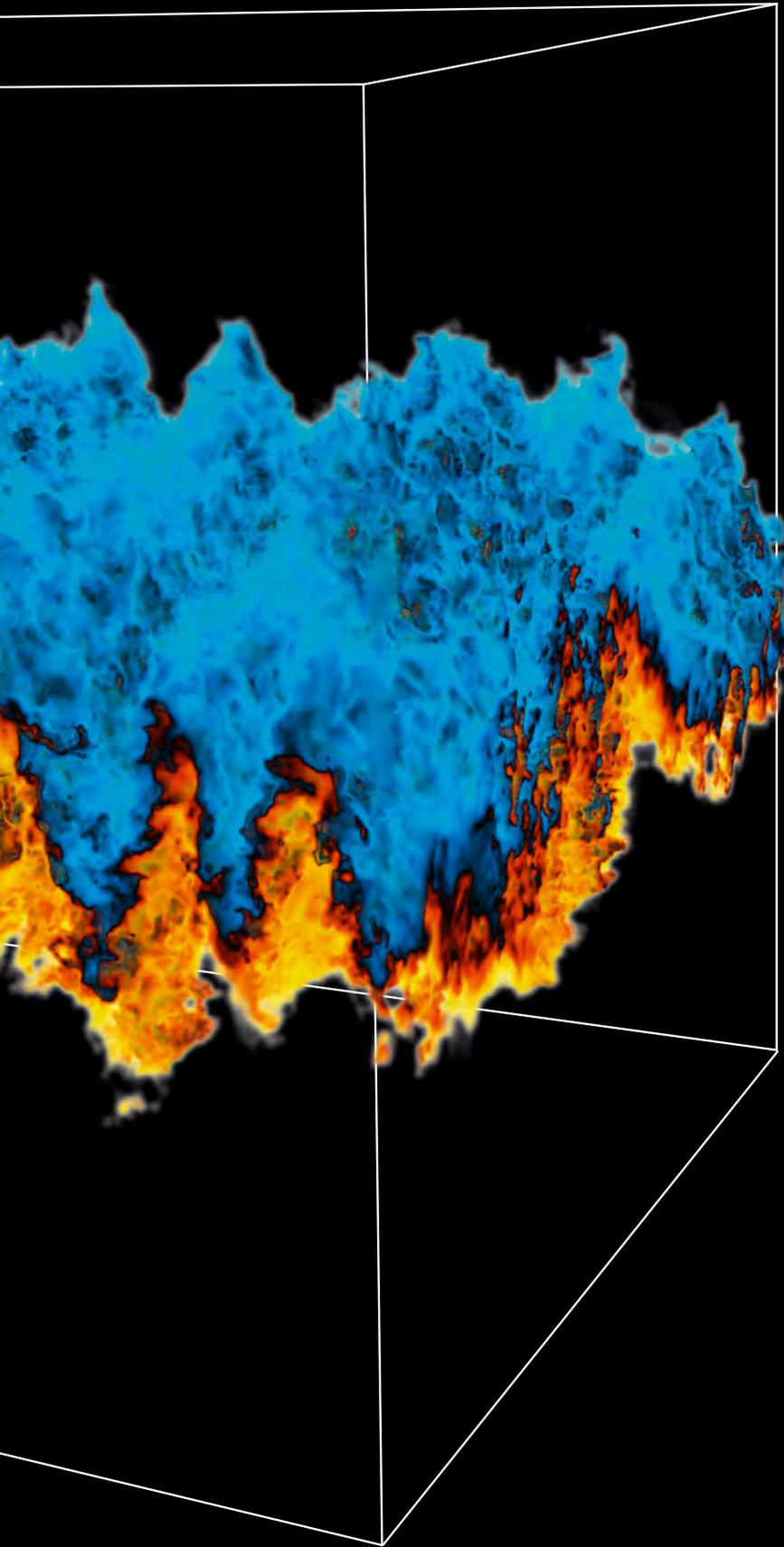
JUILLET
2020

BILAN 2019 DES PUBLICATIONS ET DE LA VIE SCIENTIFIQUE DE LA DIRECTION DES APPLICATIONS MILITAIRES



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



CHOCs AVANCÉES

N° 14 - Juillet 2020

Commissariat à l'énergie atomique
et aux énergies alternatives

Revue *chocs avancées* n° 14

Bilan 2019 des publications et de la vie scientifique
de la Direction des applications militaires.

Image de couverture : Simulation numérique directe d'une
onde gelée turbulente générée par le cisaillement horizontal
et oscillant d'une interface entre deux fluides miscibles de
densités différentes (voir article p. 34-35).

Directeur de la publication : Laurence BONNET.

Coordinateur scientifique : Denis PENNINCKX.

Comité scientifique : Denis AUTISSIER, Philippe BELLEVILLE,
Daniel BOUCHE, Serge BOUQUET, Gilles BOURGÈS, Michel
BOURZEIX, Remo CHIAPPINI, Francis HARDOUIN, Hélène HÉBERT,
Hervé JOURDREN, Pierre-Henri MAIRE, Jean-Luc MIQUEL,
Denis PENNINCKX, Thomas PLUSSON, Gilles ROY, Éric ROYER,
Éric VAN RENTERGHEM.

Rédacteur en chef : Jean-Marc LABORIE.

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

Conformité : Régine REGNAULT.

Correction : Stylience / www.stylience.fr.

Diffusion et abonnement : Régis VIZET.

La revue est consultable à l'adresse :

www-dam.cea.fr

CEA/DAM

Institut supérieur des études nucléaires
de défense (ISENdé)
Bruyères-le-Châtel, F-91297 Arpajon Cedex
Tél. : 33 (0)1 69 26 76 98
Courriel : chocs@cea.fr
www-dam.cea.fr

Brochure imprimée sur papier écogéré

ISSN 1961-7399

Dépôt légal à parution

*La reproduction totale ou partielle des informations et illustrations contenues
dans ce numéro doit être soumise à l'accord préalable du CEA.*

*Le courrier des lecteurs sera transmis aux auteurs
par le secrétariat de la revue.*



SOMMAIRE

ÉDITORIAL 02

VIE SCIENTIFIQUE 04

INTERACTION RAYONNEMENT-MATIÈRE, PHYSIQUE DES PLASMAS 12

Modélisation de la transition du solide au plasma pour la FCI en attaque directe 12

G. DUCHATEAU, A. PINEAU, B. CHIMIER, A. CASNER, V. TIKHONCHUK, S. X. HU, A. KAR, V. N. GONCHAROV, P. B. RADHA, E. M. CAMPBELL

Mise en évidence expérimentale d'instabilités laser-plasma multifaisceaux collectives 14

S. DEPIERREUX, C. NEUVILLE, V. TASSIN, M. CASANOVA, A. DEBAYLE, P.-É. MASSON-LABORDE, C. LABAUNE, V. TIKHONCHUK, D. PESME, S. HÜLLER, W. SEKA, R. E. BAHR

Modélisation des profils de raie de l'hydrogène pour le diagnostic spectroscopique des plasmas denses 16

F. GILLERON, J.-C. PAIN

Effets électromagnétiques et acoustiques des éclairs sur la Terre et dans l'espace 18

J.-F. RIPOLL, T. FARGES

Élargissement et répartition du spectre laser pour contrôler l'interaction laser-plasma 20

D. PENNINGCKX, M. DULUIC, A. BOURGEADE, A. CHATAGNIER, P. LOISEAU, A. DEBAYLE, G. RIAZUELO, C. RUYER, O. MORICE, P.-É. MASSON-LABORDE, D. BÉNISTI, E. D'HUMIÈRES

PHYSIQUE NUCLÉAIRE 22

Description du noyau de l'atome et des réactions nucléaires dans un même cadre théorique 22

S. PÉRU, S. HILAIRE, S. GORIELY

Mesure de section efficace de capture radiative : défi relevé pour le ^{173}Lu 24

A. ÉBRAN, O. ROIG, V. MÉOT, M. JANDEL, J. ULLMANN, T. BREDEWEG

PHYSIQUE DES ACCÉLÉRATEURS 26

Chocs produits par un faisceau d'électrons de très forte fluence sur une cible en aluminium 26

J. GARDELLE

PHYSIQUE DE LA MATIÈRE CONDENSÉE 28

Observation de changements structuraux du bismuth sous sollicitation dynamique 28

C. PÉPIN, A. SOLLIER, A. MARIZY, F. OCCELLI, P. LOUBEYRE

Développement de capteurs quantiques pour des mesures de magnétisme à haute pression 30

T. PLISSON, L. TORAILLE, F. OCCELLI, P. LOUBEYRE, M. LESIK, J.-F. ROCH

MATÉRIAUX, PHYSIQUE DU SOLIDE 32

Étude de la structuration du liant dans une composition énergétique 32

P. PALMAS, S. PARISSÉ, J.-F. PETIT, A. FORZY, A. LECARDEUR, S. BEAUGRAND

THERMOHYDRAULIQUE ET MÉCANIQUE DES FLUIDES 34

Zones de mélange turbulentes générées par accélérations oscillantes 34

B.-J. GRÉA, A. BRIARD, L. GOSTIAUX

MÉCANIQUE ET THERMIQUE 36

Dimensionnement dynamique prédictif de structures mécaniques non linéaires 36

J.-P. LAMBELIN, T. RONCEN, J.-J. SINOU

Modélisation de la fragmentation des charges militaires conventionnelles 38

D.-P. ZAPPA

OPTIQUE ET OPTRONIQUE 40

Tenue des composants optiques au flux de lasers à impulsion courte 40

M. CHOREL, E. LAVASTRE, L. LAMAINÈRE, A. OLLÉ, N. BLANCHOT, T. LANTEMIER, J. NEAUPORT, J. LUCE, N. ROQUIN, C. ROUYER, M. SOZET, N. BONOD, L. GALLAIS, B. BOUSQUET, S. PAPERNOV, A. A. KOZLOV, B. N. HOFFMAN, J. B. OLIVER, S. G. DEMOS, A. MELNINKAITIS

INSTRUMENTATION, MÉTROLOGIE ET CONTRÔLE 42

La chimie analytique au service de la criminalistique 42

M. C. BRIDOUX, G. GAIFFE, R. B. COLE, X. ARCHER

COMPOSANTS ET ÉQUIPEMENTS ÉLECTRONIQUES 44

Vers une connaissance microscopique des verres de phosphate P_2O_5 44

N. RICHARD, N. S. SHCHEBLANOV, L. GIACOMAZZI, L. MARTIN-SAMOS, N. OLLIER

SCIENCES DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT 46

Les témoins au secours des localisations sismiques 46

R. BOSSU, A. DUPONT, R. STEED, I. BONDÁR, A. HEINLOO, J. SAUL, A. STROLLO

CHIMIE 48

Métastabilité et réactivité des alliages de plutonium en phase δ 48

B. RAVAT, B. OUDOT, L. JOLLY, F. DELAUNAY, É. AEBY-GAUTIER, B. APPOLAIRE, I. POPA

Comportement électrochimique du plutonium dans les milieux de fluorures fondus 50

O. LEMOINE, J. CLAQUESIN, G. BOURGÈS, M. GIBILARO, L. MASSOT, P. CHAMELOT

Élaboration d'architectures alvéolaires TiC-SiC 52

T. PIQUERO, D. ROCHAIS, P. DAVID, A. BAUX, L. NOUVIAN, K. ARNAUD, G. CHOLLON, S. JACQUES

MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE SCIENTIFIQUE, LOGICIEL 54

Vers des méthodes numériques valables dans tous les régimes de compressibilité 54

E. LABOURASSE

Amélioration de la convergence des méthodes de décomposition de domaine pour la propagation d'ondes 56

M. LECOUCVEZ, P. JOLY, F. COLLINO

2019, UNE MOISSON DE RÉSULTATS SCIENTIFIQUES

Les besoins des programmes pilotés par la Direction des applications militaires (DAM) du CEA nécessitent le développement d'une recherche scientifique et technique d'excellence, portant sur des domaines variés allant de la physique microscopique de la matière au comportement sous agression de structures complexes. Cette recherche se situe bien souvent aux frontières de ce qui est aujourd'hui accessible, que ce soit par la théorie, le calcul ou la mesure : les conditions extrêmes rencontrées lors du fonctionnement des systèmes considérés conduisent en effet à explorer des domaines, par exemple en température et pression, en vitesse de déformation, en amplitude de sollicitation ou encore en intensité d'irradiation, où aucune modélisation validée n'est immédiatement disponible. Par ailleurs, malgré les capacités exceptionnelles des supercalculateurs dont dispose la DAM, et du fait notamment des tailles des systèmes à simuler, du couplage multiphysique multiéchelles des phénomènes physiques impliqués ou encore de l'amplitude des déformations subies, la simulation numérique constitue un défi en soi et de nombreux développements sont en cours pour le relever. Enfin, le niveau d'exigence quant à la précision des résultats produits est extrêmement élevé, car ceux-ci contribuent très directement à la crédibilité des travaux réalisés. C'est ainsi le cas pour les charges nucléaires, pour lesquelles, en l'absence d'essais nucléaires nouveaux, la garantie de sûreté et de performances est apportée par le programme Simulation, étendu il y a près de dix ans aux performances des têtes nucléaires. C'est également le cas pour la surveillance et la lutte

contre la prolifération, où les travaux réalisés au profit de l'État contribuent à la définition de la politique étrangère de la France. Enfin, dans le cas de la défense conventionnelle, les travaux réalisés sont exploités par les forces armées pour l'élaboration des opérations menées par la France. Cette recherche de pointe nécessite un accroissement régulier de la puissance de calcul ; les investissements réalisés pour permettre aux codes de simulation de tirer au mieux parti des nouvelles architectures des calculateurs haute performance bénéficient directement à l'accroissement de la connaissance sur les phénomènes complexes difficilement accessibles à la mesure. Ils renforcent ainsi la confiance dans la qualité de la simulation globale. Cette recherche s'appuie également sur des moyens de mesure toujours plus performants et tire le meilleur parti des installations expérimentales disponibles, qu'elles soient propres ou non au CEA – DAM, situées en France ou à l'étranger.

Les programmes de recherche correspondants s'inscrivent d'une manière générale dans la durée et c'est l'une des forces de la DAM que d'avoir la capacité de soutenir sur le long terme et au niveau requis les développements nécessaires permettant d'atteindre l'objectif. L'un des premiers résultats majeurs et à très haute visibilité obtenus en 2019 est à ce titre emblématique. La détermination sans ambiguïté de la pression de métallisation de l'hydrogène solide, prédite depuis plus de 80 ans, mais jamais observée de manière irréfutable, a été obtenue sur le synchrotron Soleil par une équipe composée de deux chercheurs de la DAM, Paul Loubeyre et Florent Occelli, et d'un

chercheur émérite du CNRS détaché à Soleil, Paul Dumas. Elle est l'aboutissement de plus de vingt ans de recherches menées au CEA – DAM. Chacun des « ingrédients » indispensables à l'obtention de ce résultat remarquable et salué par la communauté internationale a été imaginé, développé et qualifié pas à pas, que ce soient les cellules à enclumes de diamant à joint toroïdal capables d'atteindre plusieurs centaines de gigabars, l'utilisation du rayonnement synchrotron et du rayonnement infrarouge, les dispositifs de mesure permettant de caractériser précisément l'état de l'échantillon... C'est la conjonction de compétences issues de différentes disciplines, soutenue dans la durée par les besoins du programme Simulation en matière d'équation d'état de l'hydrogène, qui a permis cette réussite. Dans cette quête, l'apport des collaborations nationales et internationales développées par l'équipe du centre DAM Île-de-France doit être souligné. Cette démarche pourrait s'illustrer avec bonheur pour la plupart des résultats évoqués dans les différents articles de cette revue, que ce soit en physique nucléaire, en interaction laser-matière ou en mécanique des fluides.

Je voudrais mentionner également un résultat majeur de l'année 2019 qui est lui aussi particulièrement révélateur de la capacité de la DAM à mener des projets ambitieux sur le plan scientifique et technique et pluridisciplinaires. En effet, en fin d'année 2019, le CEA – DAM a franchi un jalon majeur du programme Simulation avec l'obtention, sur le Laser Mégajoule, de neutrons de fusion à un niveau conforme aux prévisions de calcul tridimensionnel réalisées dans un schéma complexe d'irradiation (<http://www-lmj.cea.fr/lmj-applications-defense.html>). Cette réussite, saluée par la ministre des Armées, est le fruit d'un travail collectif d'ampleur ayant mobilisé de nombreuses équipes de compétences très diverses et issues de plusieurs centres autour d'un objectif partagé. Elle témoigne de l'engagement dont font preuve les salariés et de leur capacité à se fédérer pour rassembler les énergies autour d'une même ambition, et elle conforte la DAM dans sa stratégie

de montée en puissance progressive qui aboutira, d'ici à quelques années, à la complétude de l'installation tant côté laser que diagnostics.

Je pourrais multiplier les exemples pour illustrer les apports de la recherche telle qu'elle est menée à la DAM en soutien aux programmes, souvent qualifiée de « amont et finalisée ». Les résultats obtenus, notamment dans le cadre de thèses de doctorat ou de postdoctorats réalisés au CEA – DAM ou au sein de laboratoires académiques dans le cadre de collaborations, se matérialisent par des publications dans des revues à comité de lecture dont certaines, généralistes, sont à très haut facteur d'impact, comme vous pourrez le constater à la lecture de ce numéro. Ces résultats se concrétisent également dans le nombre croissant d'habilitations à diriger les recherches (HDR) obtenues en 2019, ce dont je me réjouis. Outre le leadership des experts de la DAM dont elles témoignent, ces HDR contribuent au rayonnement de la recherche menée et à son attractivité, ce qui permettra, dans la durée, de continuer à attirer des étudiants dans les domaines scientifiques et techniques nécessaires aux programmes.

Je vous invite à feuilleter les articles de cette nouvelle édition de la revue *Avancées* qui présentent, chacun dans leur domaine, un panorama de travaux ayant fait l'objet de publications en 2019. Cette sélection est toujours difficile et je remercie le coordinateur scientifique de ce numéro, M. Denis Penninckx, directeur de recherche en optique et spécialiste des fibres optiques et des lasers, d'avoir rempli ce rôle. Il a réussi, avec l'appui du rédacteur en chef des revues Jean-Marc Laborie et malgré les conditions d'interaction avec les rédacteurs d'articles dégradées par le contexte de crise sanitaire, à respecter globalement le calendrier de réalisation.

Bonne lecture à tous !



Mention Paul-Vieille de l'association Af3P

Mandaté par l'association française de pyrotechnie et du patrimoine pyrotechnique (Af3P), le comité de sélection Paul-Vieille a attribué en juin à **Gérard BAUDIN**, du CEA – Gramat, un prix mention spéciale Paul-Vieille pour son engagement professionnel et l'ensemble de ses travaux dans le domaine de la détonique théorique et expérimentale.

Prix de l'innovation de l'International Conference CBRNE Research & Innovation

Le prix de l'innovation a été attribué *ex aequo* à **Frédéric PROGENT** du CEA – DAM Île-de-France pour le projet de développement d'un microspectromètre de masse lors de l'International Conference CBRNE Research & Innovation à Nantes. Ce matériel est dédié à la détection chimique de terrain et peut avoir de multiples domaines d'application (sécurisation d'installations, analyse environnementale, industrie chimique, analyse dans des espaces contraints tels que les boîtes à gants). Ce développement instrumental original s'inscrit dans le cadre du programme interministériel de R&D NRBC-E et unit les efforts du CEA – DRT/Leti et du CEA – DAM Île-de-France. Ce prix salue un projet ambitieux et pluridisciplinaire.

Trophées de la simulation numérique

À l'occasion du forum Ter@tec en juin, le projet EMERGENCIES, mis en œuvre dans le cadre de grands défis sur les moyens HPC du Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) au CEA – DAM Île-de-France et d'une collaboration entre le CEA et la société Mokilia, a été récompensé par un trophée de la simulation numérique décerné par un jury de hautes personnalités, réuni par l'*Usine nouvelle* et l'*Usine digitale*. EMERGENCIES a pour ambition de prévoir la météorologie locale et de simuler en temps accéléré la dispersion d'éventuels rejets atmosphériques, accidentels ou malveillants, à résolution métrique, dans des domaines urbains géants 3D tels que la ville de Paris et sa périphérie ou les agglomérations de Marseille, Toulon et Nice dans les exemples réalisés.

Student award of the Aeroballistic Range Association

Vincent JAULIN, doctorant au CEA – Cesta, a reçu un *Student award of the Aeroballistic Range Association*, pour ses travaux de thèse associés au projet FUI ATIHS (Amélioration de la Tenue des structures satellites aux Impacts Hyper-vitesse de débris Spatiaux), portant sur l'amélioration de la tenue aux impacts hypervéloces des structures de satellites.

Fellow of the American Physical Society et prix des éditeurs de HPCwire

Luc BERGÉ, directeur de recherche au CEA – DAM Île-de-France, a été élu *Fellow of the American Physical Society* (APS). Il s'agit d'une reconnaissance prestigieuse par ses pairs « pour ses contributions théoriques d'avant-garde sur la propagation d'ondes non linéaires, la filamentation laser et la production de rayonnement térahertz au moyen de lasers femtoseconde ». Par ailleurs, **Luc BERGÉ** et son équipe ont reçu le prix des éditeurs de HPCwire pour l'utilisation du calcul haute performance pour les sciences du vivant dans le cadre du projet Capitol (*Computing Accelerated Particles, Intense Terahertz and Optical radiation by Lasers*). Objet d'une allocation Prace de 24,1 millions d'heures de calcul sur la machine Curie du Très Grand Centre de calcul (TGCC), ce projet a permis de simuler numériquement avec les codes Calder et CUP3D la production de photons et de particules par laser en vue d'applications médicales (imagerie et détection de tumeurs cancéreuses).

Élection à l'Union radioscopique internationale (URSI)

Thomas FARGES, du CEA – DAM Île-de-France, a été élu en février à la vice-présidence de l'URSI France qui a pour but de coordonner à l'échelle nationale les études dans les domaines des sciences de la radioélectricité, des télécommunications, de l'électronique et de la photonique. URSI France est placée sous l'autorité de l'Académie des sciences et représente la communauté française auprès de l'URSI.

Prix de l'école doctorale Ondes et Matière

Alisée NGUYEN, doctorante au CEA – DAM Île-de-France, a été récompensée par le prix de l'école doctorale Ondes et Matière de l'université Paris-Saclay, décerné à l'unanimité pour son travail de thèse intitulé *Contrôle de rayonnements térahertz intenses produits par lasers femtoseconde et applications à la détection de molécules*. Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse ont permis de démontrer l'efficacité de plasmas d'air excités par des impulsions laser femtoseconde opérant à deux fréquences différentes (deux « couleurs ») pour émettre un champ térahertz élevé (proche du GV/m) et à très large bande (jusqu'à 60 THz). Le rayonnement émis a permis de mesurer de très nombreuses signatures spectrales de matériaux variés, dont des explosifs.

Student Program Award of the 70th ARA meeting

Le *Student Program Award of the 70th Aeroballistic Range Association meeting* a été attribué à **Thomas ELIA**, doctorant au CEA – Gramat de l'université Paris-Saclay, pour ses travaux sur l'étude théorique et expérimentale de l'amorçage par choc et de la détonation de compositions énergétiques intégrant des additifs oxydants et métalliques réactifs.

Prix Science & Technology

La conférence Science and Technology de l'Otice s'est tenue à Vienne en juin, avec de nombreux représentants du CEA – DAM venus présenter les dernières avancées scientifiques et technologiques développées en lien avec les activités de l'Otice. **Julien VERGOZ**, du CEA – DAM Île-de-France, a obtenu le prix de la meilleure présentation orale portant sur l'analyse des signaux hydroacoustiques associés à la perte du sous-marin *San Juan* en 2017 dans l'océan Atlantique.

Les Étoiles de l'Europe

Le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation a créé un prix intitulé « Les Étoiles de l'Europe » pour valoriser l'engagement des chercheurs français dans les projets de recherche du programme-cadre européen. **Élisabeth BLANC**, du CEA – DAM Île-de-France, a reçu le trophée pour la coordination depuis 2012 du projet ARISE (*Atmospheric dynamics Research Infrastructure in Europe*), projet d'infrastructure de recherche dans le domaine des infrasons et de la dynamique de l'atmosphère.

Prix de thèse de la chaire Défense & Aérospatial

Marine CHOREL, ingénieure de recherche au CEA – Cesta, a reçu le prix de thèse de la chaire Défense & Aérospatial pour ses travaux menés au CEA – Cesta sur l'étude des traitements multicouches utilisés dans un environnement à très faible hygrométrie sur les installations laser de puissance, en collaboration avec le Laboratory for Laser Energetics (LLE) de l'université de Rochester, aux États-Unis, et l'Institut Fresnel, unité mixte de recherche du CNRS, d'Aix-Marseille Université et de Centrale Marseille dans le cadre du Laboratoire de recherche conventionné LOLAH (Laboratoire optique lasers et hyperfréquences).

Prix de thèse de l'école doctorale Génie électrique, électronique, télécommunications

Jérémy-Marie PLEWA a reçu le prix de la meilleure thèse de l'école doctorale Génie électrique, électronique, télécommunications de l'université de Toulouse pour sa thèse préparée au CEA – Gramat sur l'étude de l'influence des plasmas dans les diodes à électrons pour la radiographie éclair, et qui a notamment rendu possible avec le CEA – Valduc une nette amélioration des performances radiographiques d'Epure.

Réussite de la première expérience de fusion au Laser Mégajoule

La première expérience d'implosion avec fusion nucléaire au Laser Mégajoule a eu lieu avec succès le 11 octobre et a donné des résultats conformes aux calculs 3D de prévision. Cette réussite marque le franchissement d'un jalon majeur du programme Simulation pour la garantie des armes nucléaires françaises.

Nouvelles campagnes d'expériences pour la recherche académique sur LMJ-Petal

Deux campagnes internationales d'ouverture ont été réalisées sur l'installation Laser Mégajoule-Petal. L'une, dédiée à l'approche, dite d'allumage par choc, de la fusion par confinement inertiel, a permis d'étudier l'effet du lissage des faisceaux laser sur la génération d'électrons énergétiques et leur influence sur la propagation d'un choc fort dans un milieu préchauffé. L'autre, grâce au faisceau de protons créé par Petal, a étudié l'évolution des champs magnétiques produits par l'impact des faisceaux laser LMJ sur cible et observé la reconnexion de lignes de champ magnétique ; ce phénomène intéresse aussi les astrophysiciens qui cherchent à expliquer les éruptions solaires. L'installation LMJ-Petal est la seule permettant d'aborder ce genre d'expériences avec la précision requise.

Découverte de l'épave de la *Minerve* : contribution décisive du CEA – DAM

Le 27 janvier 1968 à 7 h 59, le sous-marin disparaissait au large de Toulon. Le Laboratoire de détection et de géophysique (LDG) du CEA – DAM avait enregistré des signaux sismiques attribués à l'accident, mais la localisation n'avait pas abouti. En mars 2019, le ministère des Armées a demandé le soutien du CEA pour reprendre des recherches. L'exploitation des signaux et d'archives, couplée à l'expertise en traitement du signal et à la puissance des calculateurs, a permis au LDG de redéfinir la zone de recherche et ses incertitudes. Ces données et celles de la Marine nationale et du SHOM (Service hydrographique et océanographique de la Marine) ont motivé en juillet 2019 de nouvelles prospections et une cartographie des fonds par le navire *Antéa* de l'Ifremer, avant que le *Seabed Constructor*, de la société Ocean Infinity, ne localise l'épave le 21 juillet par 2 370 m de fond.

Divergence de la chaufferie nucléaire du *Suffren*

Après le lancement du *Suffren*, premier sous-marin nucléaire d'attaque de type Barracuda, le 12 juillet en présence du président de la République Emmanuel Macron, une nouvelle étape a été franchie avec la divergence du réacteur le 17 décembre, prélude à ses premiers essais à la mer avant sa livraison en 2020. La divergence consiste à enclencher, pour la première fois, une réaction nucléaire maîtrisée dans le cœur de la chaufferie.

Installation Epure : caractérisation de la machine Merlin et essai franco-britannique réussi à Gramat

La dernière campagne de caractérisation de la machine de radiographie éclair Merlin, qui constituera le deuxième axe de l'installation Epure, située au CEA – Valduc, a été réalisée à Aldermaston, au Royaume-Uni, début 2019 dans l'installation franco-britannique TDC (*Technology Development Center*) située à l'Atomic Weapons Establishment (AWE). Les performances radiographiques escomptées ont été atteintes et le transfert de la machine à Valduc est en cours. Par ailleurs, dans le cadre du processus d'approbation par l'Autorité de sûreté nucléaire française de défense des équipements nationaux que les Britanniques vont utiliser dans le cadre de leurs expérimentations sur Epure, un essai de sûreté au profit du ministère de la Défense britannique a été réalisé au CEA – DAM dans le centre de Gramat. Il a permis de démontrer le bon fonctionnement du système de traitement des produits de détonation et de l'inertage de la cuve échelle réduite britannique.

→ LIVRES PARUS EN 2019

Amplification d'impulsions à dérive de fréquence

E. Hugonnot (CEA – Cesta)

Article paru aux *Techniques de l'ingénieur*, rubrique Optique physique, référence E 6515, consultable à l'adresse <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/optique-physique-42528210/amplification-d-impulsions-laser-a-derive-de-frequence-e6515>

Hyperspectral Imaging

Série Data Handling in Science and Technology (vol. 32)

J. M. Amigo (édité par),

R. Marion (CEA – DAM Île-de-France) coauteur du chapitre 3.2 intitulé « Applications in remote sensing-anthropogenic activities »

Elsevier. Paperback ISBN 978-0-444-63977-6

Energy Density Functional Methods for Atomic Nuclei

N. Schunck (édité par),

J.-P. Ébran (CEA – DAM Île-de-France)

auteur du chapitre 2 et coauteur du chapitre 3

IOP Publishing Ltd, Bristol, Royaume-Uni, 477 p., 2019. Print ISBN 978-0-7503-1422-0

Exploring the Earth System with Imaging Spectroscopy

Space Sciences Series of ISSI (vol. 70)

S. Foerster, L. Guanter, T. Lopez, J. Moreno, M. Rast,

M. E. Schaepman (éditeurs),

R. Marion (CEA – DAM Île-de-France) coauteur du chapitre intitulé « Imaging spectroscopy for the detection, assessment and monitoring of natural and anthropogenic hazards ».

Springer. ISBN 978-3-030-24909-0

General Meeting de la collaboration DAM-NNSA Basic Science

Le *General Meeting* de la collaboration DAM-NNSA Basic Science s'est déroulé du 5 au 7 juin au bâtiment ILP à côté du CEA – Cesta. Il a rassemblé une quarantaine de personnes issues des centres de la DAM et des laboratoires homologues (LLNL, LANL, SNL) et a permis de faire un point détaillé d'avancement des travaux menés sur chacun des 25 projets en cours. Les présentations ont montré l'apport des partenaires et le bénéfice mutuel apporté par la collaboration, dans laquelle l'ensemble des centres de la DAM est désormais impliqué.

Conférence internationale High Temperature Ceramic Matrix Composites (HT-CMC10)

La dixième conférence sur les matériaux composites à matrice céramique pour les applications à haute température HT-CMC10 s'est déroulée du 22 au 26 septembre à Bordeaux. Avec l'aide du CEA – DAM et de Safran Ceramics, le Laboratoire des composites thermostrostructuraux (LCTS) a organisé cette conférence qui a rassemblé plus de cinq cents participants de vingt-neuf pays différents. Dix-sept domaines de recherche ont fait l'objet d'une session spécifique, dont les composites haute température, la fabrication additive, les fibres et les préformes, et la modélisation.



Conférence Europyro

Organisée à Tours en juin, la conférence Europyro a été couplée au 44^e séminaire de l'International Pyrotechnics Seminar (IPS) et à la Journée de la détonique dédiée aux techniques de caractérisation innovantes au service de la simulation des propriétés des matériaux énergétiques. Les thèmes abordés ont été très variés : synthèse, caractérisation, modélisation, processus de fabrication, nouveaux explosifs, détonateurs, propulsion solide, sécurité pyrotechnique, écoconception. Le CEA – Le Ripault a largement contribué à cet événement qui permet à la DAM de se positionner comme un acteur majeur dans le domaine des matériaux énergétiques et des dispositifs pyrotechniques.

Journées sol-gel

Le CEA – Le Ripault a organisé les 7, 8 et 9 octobre la 7^e édition nationale des Journées sol-gel à Tours. Cette année, ces journées ont été l'occasion de mettre en relief, avec l'ensemble des acteurs de la recherche fondamentale et industrielle du domaine, les enjeux et les voies de recherche dans le domaine des procédés et des caractérisations. Les thématiques majeures de l'édition 2019 ont porté sur les couplages entre chimie et procédés, et sur les caractérisations *in situ*. L'édition 2019 a réuni 80 participants, dont des industriels et de nombreux jeunes scientifiques.

Colloque de la physique de l'ignition par voie laser

Dans le cadre de la collaboration entre le CEA – DAM et la National Nuclear Security Administration (NNSA) sur la physique des expériences de fusion par confinement inertiel, un colloque a réuni les 20 et 21 juin au CEA – DAM Île-de-France des experts de la DAM et du Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Les échanges ont plus particulièrement porté sur l'interprétation des expériences réalisées jusqu'ici avec l'installation laser américaine NIF (National Ignition Facility) pour atteindre l'ignition du mélange deutérium-tritium. Des pistes d'études inédites ont été identifiées et un programme de travail collaboratif entre la DAM et le LLNL a été établi pour les approfondir. La conception des futures expériences d'ignition sur le Laser Mégajoule bénéficiera grandement de ce retour d'expérience.

Journées matériaux numériques

Le CEA – Le Ripault a organisé du 17 au 19 juin à Amboise les 4^{es} Journées matériaux numériques qui rassemblent les acteurs de la communauté nationale œuvrant dans tous les domaines concernés par la représentation numérique 3D de la microstructure des matériaux, dans le but de comprendre et prévoir leur comportement, de concevoir et d'élaborer des matériaux optimisés. Les thèmes abordés couvrent les mesures locales de propriétés, les techniques de numérisation (microscopies, tomographie X, FIB/MEB, etc.), la génération de matériaux virtuels, les mathématiques appliquées (segmentation, analyse morphologique), la modélisation du comportement de matériaux numériques et les techniques d'impression de matériaux numériques (fabrication additive). Lors de cette dernière édition, une recrudescence de présentations de doctorants et postdoctorants a été constatée, signe de l'intérêt et du besoin d'un tel événement, qui accueille en moyenne 70 participants.

Journée CCRT

Pilotée par des équipes du CEA – DAM Île-de-France, la journée CCRT s'est déroulée le jeudi 12 décembre au sein du Très Grand Centre de calcul (TGCC) du CEA. Avec plus de 110 participants, cet événement était organisé en deux temps : un premier temps présentant les retours d'expérience et les cas d'usage du CCRT pour des partenaires comme l'Ineris, l'IRSN, Soleil, Thales DMS, Valeo ou encore le CEA – DEN, et un deuxième temps consacré aux premiers pas du Cerfacs, d'EDF, du CEA – DAM dans le domaine du quantique, en particulier sur le simulateur quantique Atos (QLM) du CCRT.

Workshop Abinit

Intitulée cette année *Abinit hands-on 2019: a newcomer-oriented school to ab initio nanoscience simulations*, cette école a fait le lien entre le cadre théorique et le savoir-faire pratique pour mener à bien des calculs de structure électronique avec le code Abinit. Organisée par le CEA – DAM Île-de-France, l'école s'est tenue sur le campus Teratec du 21 au 25 janvier et a réuni 35 participants.

Journées ondes du Sud-Ouest

Les Journées ondes du Sud-Ouest (JOSO) se sont déroulées du 12 au 14 mars au bâtiment ILP à proximité du CEA – Cesta. Organisé par l'Inria, l'Onera et le CEA – Cesta, ces journées ont rassemblé une cinquantaine de scientifiques issus de l'Onera, d'Airbus R&T, de l'Inria, de l'université de Pau et des pays de l'Adour, des laboratoires XLIM de Limoges et IMS de Bordeaux, du Centre de mathématiques appliquées de l'École polytechnique, de l'INSA Toulouse, de l'ENSTA et du CEA – DAM. Les vingt-cinq présentations effectuées dans ce cadre ont couvert les aspects suivants : modélisation physique, méthodes numériques, calcul haute performance (HPC) et problèmes inverses, et ont suscité des échanges scientifiques particulièrement fructueux.

Premières journées de la physique nucléaire au CEA

Dans le cadre de la feuille de route de la physique nucléaire au CEA, un séminaire rassemblant environ 70 participants de la DAM, de la DEN et de la DRF du CEA s'est déroulé les 12 et 13 mars au Très Grand Centre de calcul afin de nouer de nouvelles collaborations entre les directions. Après un panorama des activités de chacune des directions, les travaux de recherche sur la structure nucléaire, les réactions nucléaires et le processus de fission, couvrant à chaque fois les domaines théoriques, expérimentaux et applicatifs, ont été présentés lors de ces journées. Consultable *via* le site www-dam.cea.fr, la revue *Focus* n° 7 rassemble les actes de ces journées.

6^{es} Journées de la vélocimétrie hétérodyne

Les 6^{es} Journées de la vélocimétrie hétérodyne (VH) se sont déroulées du 18 au 20 septembre au bâtiment ILP à côté du CEA – Cesta. L'organisation de ces journées du groupe de recherche (GDR) ACO-Chocolas a été confiée au CEA – Cesta et a enregistré un record de participation, avec 75 personnes issues du CNRS, des universités, d'industriels du secteur, comme Thales, Safran, ArianeGroup et Thiot Ingénierie, et d'unités du CEA – DAM et du CEA – Saclay. Les vingt-six présentations, dont douze du CEA – DAM, et huit posters ont abordé les techniques expérimentales innovantes comme le Visar fibré couplé avec la VH, la VH multiplexée, la télémétrie par interférence spectrale, mais également les incertitudes expérimentales associées aux mesures vélocimétriques et des exemples de résultats expérimentaux et numériques associés à diverses applications.

Journées techniques Cetama

Les Journées techniques Cetama « Analyse élémentaire et isotopique : défis actuels et futurs » se sont tenues au château d'Amboise les 7 et 8 octobre. Organisées suite à la parution du guide *La Validation de méthode en spectrométrie d'émission atomique à source plasma* aux éditions EDP Sciences, elles ont réuni 50 participants issus de différents organismes de recherche (CEA, Orano, EDF, IRSN, CNRS) et universités (celle de Pau en particulier). Le CEA – Le Ripault a fortement participé à l'organisation de ces journées ; il a également contribué à son programme scientifique.

Séminaire Dynamique de l'atmosphère

Le séminaire Dynamique de l'atmosphère, organisé par le groupe de travail Environnement terrestre du CEA, s'est tenu le 21 janvier au sein du Centre national d'alerte aux tsunamis (Cenalt) au CEA – DAM Île-de-France. Il a rassemblé plus de 20 scientifiques, dont des experts issus de différentes directions du CEA (DAM, DRF, DEN), et du CNRS Latmos. Jean-François Mahfouf, chercheur à Météo France et au CNRM (Centre national de recherche météorologique), a présenté des travaux intitulés « Observations de la dynamique atmosphérique pour la prévision numérique du temps : état des lieux et besoins futurs ». D'autres interventions ont porté sur les dernières avancées des projets européens ARISE1 et ARISE2 coordonnés par le CEA – DAM Île-de-France et impliquant d'autres partenaires scientifiques européens. Ces avancées constituent notamment la réalisation du couplage des infrasons avec d'autres instruments, comme les lidars, lesquels permettent une évaluation des modèles comme celui développé par le Centre européen de prévision météorologique à moyen terme (CEPMMT).

Accord CEA – DAM – Université de Pau et des pays de l'Adour

Le président de l'université de Pau et des pays de l'Adour (UPPA), Mohamed Amara, et le directeur du CEA – Cesta, Jean-Pierre Giannini, représentant le Directeur des applications militaires, ont signé le 11 octobre un accord de partenariat pour développer et renforcer leurs actions communes de formation et de recherche sur quatre thèmes principaux. Deux thèmes concernent le CEA – DAM Île-de-France : chimie analytique et physico-chimie (détection et analyse de traces, études de transport de polluants, etc.) ainsi que sûreté, sécurité et environnement (études des tsunamis de source gravitaire). Le thème de la modélisation physique et de la simulation HPC pour l'électromagnétisme et l'aérodynamique concerne le CEA – Cesta, qui est également impliqué dans le thème de la physique et de la technologie des hautes puissances pulsées avec le CEA – Gramat.

Création du laboratoire de recherche conventionné LOLaH

L'Institut Fresnel à Marseille est une UMR de l'université Aix-Marseille, de Centrale Marseille et du CNRS avec laquelle le CEA – DAM entretient des relations étroites depuis une vingtaine d'années, aussi bien autour des optiques du Laser Mégajoule que des hyperfréquences. Un premier accord-cadre de collaboration entre la DAM et l'Institut Fresnel avait été conclu en 2013. Ce partenariat est maintenant renforcé dans le cadre d'un laboratoire de recherche conventionné (LRC) nommé LOLaH pour Laboratoire Optique Lasers et Hyperfréquences. Huit thématiques impliquant des équipes du CEA – Cesta et du CEA – Le Ripault ont d'ores et déjà été définies : de la métrologie autour des optiques à la mise en œuvre de tissus techniques en passant par les techniques de polissage et les hyperfréquences.

Création du laboratoire de recherche conventionné FleCHE

L'accord entre le CEA – DAM et l'institut Pprime vise à développer des actions communes de formation et de recherche selon une culture partagée de la simulation (expérimentation, modélisation physique, simulation numérique). Baptisé FleCHE pour Fluides, Chocs et Énergétique, ce nouveau laboratoire de recherche conventionné s'organise autour des thèmes du comportement dynamique des matériaux (CEA – Gramat, CEA – Cesta, CEA – DAM Île-de-France et CEA – Le Ripault) et de la mécanique des fluides (CEA – Cesta). Le comportement des matériaux sous très hautes vitesses de sollicitation intègre ici les domaines suivants : compaction sous choc, impacts hypervéloces sur matériaux composites, exploration du diagramme de phase des matériaux, caractérisation des matériaux et expertises microstructurales, comportement mécanique et réactif des matériaux énergétiques. La mécanique des fluides concerne ici les écoulements laminaux ou turbulents et va, en termes de Mach, de l'incompressible (hydraulique et thermohydraulique) à l'hyperonique (aérodynamique, aérothermique, interactions écoulement-particules).

Création du laboratoire de recherche conventionné CoSma

Cette structure, dénommée Comportement des structures et des matériaux (CoSma), a vocation à renforcer les collaborations des différentes équipes du CEA – Le Ripault et du Laboratoire de mécanique Gabriel-Lamé, des universités d'Orléans, de Tours et de l'Insa Centre-Val de Loire. Les domaines de recherche de ce laboratoire couvrent quasiment l'ensemble des matériaux développés ou fabriqués au CEA – Le Ripault (explosifs, mousses, élastomères, composites), les procédés de synthèse ou d'élaboration, ainsi que les techniques les plus avancées de modélisation numérique.

Accord CEA – DAM – Université Paul-Sabatier Toulouse III

Le CEA – DAM collabore depuis longtemps avec l'université Paul-Sabatier Toulouse III, notamment sur les thématiques de l'électronique et des plasmas avec le CEA – Gramat, et également avec les centres DAM Île-de-France, Cesta et Valduc. Pour faciliter et amplifier les collaborations de recherche, un accord de partenariat a été signé en septembre sur les axes de recherche suivants : modélisation et calcul numérique, mécanique des fluides et des solides, électronique, traitement du signal et de l'image, mécanique et énergétique, procédés physico-chimiques, mathématiques et applications, génie mécanique en aéronautique, physique et astrophysique, énergie électrique et automatique, et systèmes de management.

Projet Altesse2 pour la détection de molécules par rayonnement térahertz

Faisant suite au projet Altesse (Air Laser-based TeraHertz Spectroscopy of Explosives), financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR) et l'Agence de l'innovation de la défense (AID), et piloté par le CEA – DAM Île-de-France, le projet Altesse2 a été retenu en tant que projet « Astrid-Maturation ». Il regroupe plusieurs organismes (CEA – DAM Île-de-France, Institut lumière-matière de Lyon, DTU/Fotonik au Danemark) et des industriels (Amplitude Technologies et Imagine Optic). Altesse2 permettra de fiabiliser le nouveau concept de détection de molécules complexes, dont des explosifs, à partir du rayonnement térahertz émis par un plasma d'air produit par des lasers ultrabrefs à deux harmoniques, validé par le projet Altesse, dans le but de mettre en œuvre un futur démonstrateur. Ces travaux seront complétés par une étude du régime de filamentation laser et par des simulations *ab initio* et d'apprentissage numérique permettant d'identifier les molécules détectées à partir des spectres d'absorption mesurés.

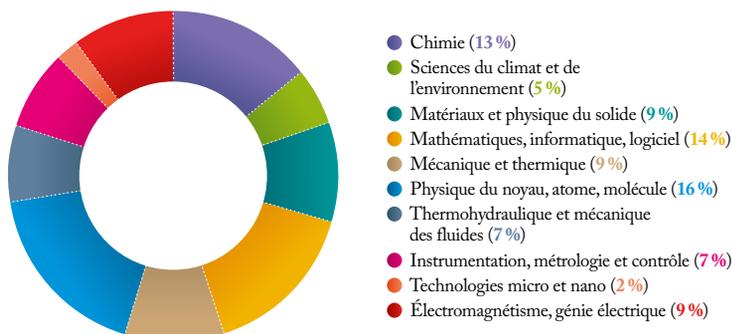
Convention de collaboration CEA – DAM – Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE)

En raison de leur intérêt commun pour la métrologie infrasonore, le CEA – DAM et le LNE ont souhaité poursuivre leurs collaborations scientifiques au travers d'une convention intitulée « Garantir la traçabilité de la mesure infrasonore au système international d'unités SI ». La précédente collaboration avait abouti au développement de deux nouveaux moyens d'étalonnage garantissant la traçabilité des mesures au système international d'unités, utilisés dans chacun des organismes. Ce cadre vise à prolonger les travaux autour de ces deux équipements, à participer à des comparaisons internationales et à contribuer à la révision de la norme internationale IEC 61094-2 dédiée à l'étalonnage des microphones par méthode primaire en basse fréquence.

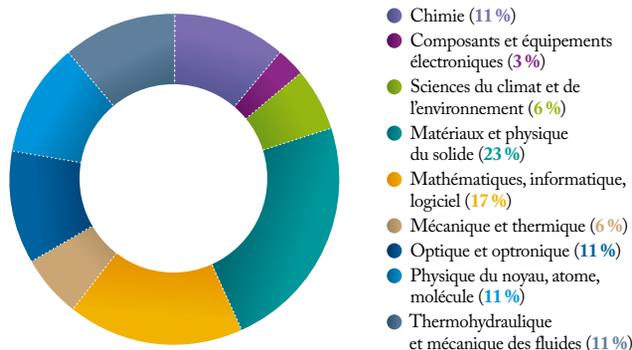
→ THÈSES SOUTENUES ET EN PRÉPARATION - POSTDOCTORATS

En 2019, 136 doctorants préparaient une thèse au CEA – DAM, soit dans un laboratoire d'un des cinq centres, soit dans un laboratoire partenaire avec le soutien financier du CEA – DAM ; 54 l'ont soutenue au cours de l'année et 2 salariés de la DAM l'ont soutenue en VAE. D'autre part, 35 docteurs étaient en contrat postdoctoral.

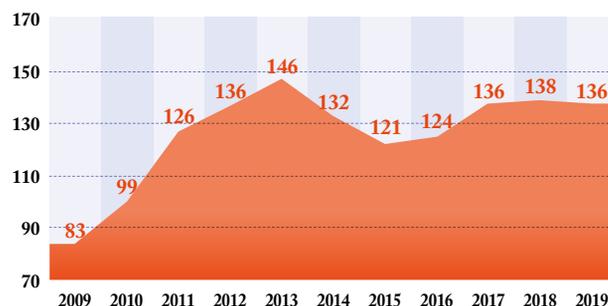
→ Répartition des thèses soutenues par domaine scientifique et technique



→ Répartition des postdoctorats par domaine scientifique et technique



→ Nombre de thèses en cours 2009-2019



→ HABILITATIONS À DIRIGER LES RECHERCHES

Gaël Poëtte

CEA – Cesta

Université de Bordeaux
Spécialité : analyse numérique.

Émeric Falize

CEA – DAM Île-de-France

Observatoire de Paris
Spécialité : astrophysique.

Pierre Minvielle

CEA – Cesta

Université de Pau et des pays de l'Adour
Spécialité : statistiques.

Guillaume Perrin

CEA – DAM Île-de-France

Université Paris-Sud
Spécialité : mathématiques.

Pierre-Laurent Coddet

CEA – Le Ripault

Université de Tours
Spécialité : développement de procédés.

Christophe Millet

CEA – DAM Île-de-France

ENS Paris-Saclay
Spécialité : mathématiques appliquées.

Olivier Roig

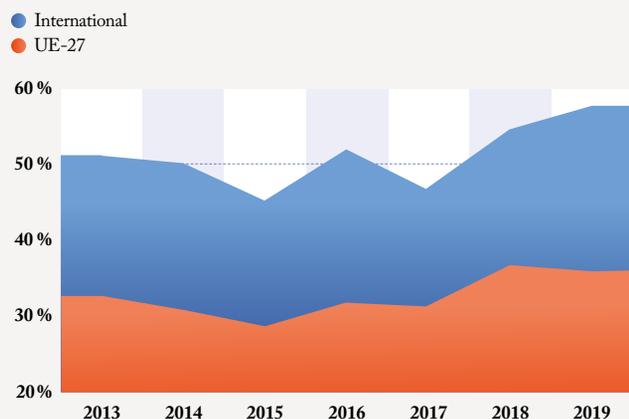
CEA – DAM Île-de-France

Université Paris-Saclay
Spécialité : physique nucléaire.

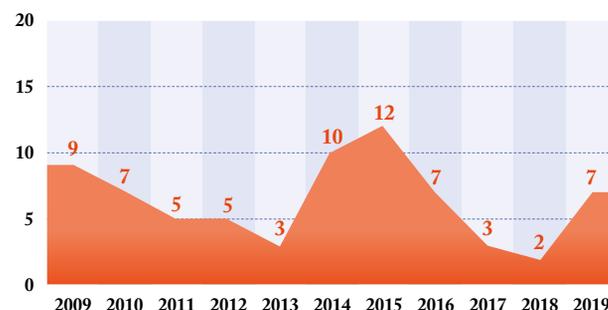
→ PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

En 2019, le CEA – DAM a publié 432 articles et comptes rendus de conférence dans des journaux à comité de lecture, ainsi que 36 comptes rendus de conférence dans un livre ou dans une série (ISI-Web of Science, 02/07/2020).

→ Proportion de publications en collaboration internationale



→ Nombre de HDR soutenues 2009-2019



CHIMIE

- ✉ **Clément BESNARD**, Dépôts d'oxydes obtenus par caléfaction sur des substrats plans ou fibreux pour l'obtention de matériaux composites, université de Bordeaux.
- ✉ **Laurent CARETTE**, Étude des mécanismes de formation des carbures obtenus par cémentation basse pression d'un alliage de tantale – Application à la pyrochimie, université Bourgogne Franche-Comté.
- ✉ **Matthieu DANIEL**, Méthodes de synthèse d'hétérocycles azotés fonctionnalisés et application aux matériaux énergétiques, université d'Orléans.
- ✉ **Maxence GIRAUDET**, Coadsorption de l'hydrogène et du deutérium sur zéolithes à températures cryogéniques : effet des propriétés de l'adsorbant sur la sélectivité, université Bourgogne Franche-Comté.
- ✉ **Arnaud MONPEZAT**, Développement d'un procédé ultra-compact pour le traitement des gaz rares, université de Lyon.
- ✉ **Anne-Laure RONZANI**, Étude du couplage ablation laser – ICP-MS pour la détection des activités nucléaires ; application à l'analyse de microparticules d'uranium, École nationale supérieure de chimie de Montpellier.
- ✉ **Jean-Louis VICTOR**, Étude et réalisation de dispositifs thermochromes pour l'efficacité énergétique, université de Bordeaux.

SCIENCES DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT

- ✉ **Caroline KAUB**, Déformation active intraplaque : étude pluridisciplinaire terre-mer du risque sismique en Vendée à partir du séisme du Marais Breton de 1799 (M=6), université de Brest.
- ✉ **Emmanuelle MARIA**, Migration augmentée de l'uranium dans les eaux souterraines par voie colloïdale, université de Pau et des pays de l'Adour.
- ✉ **Timothé ROBINEAU**, Caractérisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère karstique – Traitement du signal et modélisation double milieu des écoulements et du transport, université Paris sciences et lettres.

MATÉRIAUX, PHYSIQUE DU SOLIDE

- ✉ **Nicolas CLICHE**, Recristallisation et propriétés mécaniques d'un acier inoxydable austénitique stabilisé au niobium, Mines ParisTech.
- ✉ **Bastien GUIGUE**, Structures et propriétés de transport de quelques superhydrures sous pression, université Paris sciences et lettres.
- ✉ **Joane MEYNARD**, Étude de l'influence de la morphologie de la porosité sur la conductivité thermique d'un combustible UO_2 , université Aix-Marseille.
- ✉ **Sandrine ROCHER**, Étude des mécanismes de croissance de mousses métalliques élaborées par plasma électrolytique, université Bourgogne Franche-Comté.
- ✉ **Thomas NUSSLE**, Thermomécanique dynamique à grande échelle des matériaux magnétiques, université de Tours.

MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE SCIENTIFIQUE, LOGICIEL

- ✉ **Hugo BRUNIE**, Optimisation des allocations de données pour des applications de calcul haute performance sur une architecture à mémoires hétérogènes, université de Bordeaux.
- ✉ **Guillaume COLIN DE VERDIÈRE**, À la recherche de la haute performance pour les codes de calcul et la visualisation scientifique, université de Reims Champagne-Ardenne.
- ✉ **Cécile DEFFORGE**, Data assimilation for micro-meteorological applications with the fluid dynamics model Code_Saturne, université Paris-Est.

- ✉ **Émeline GAYRARD**, Analyse bayésienne de la détermination de la gerbe d'éclats provoquée par l'explosion d'une bombe à fragmentation naturelle, université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand.
- ✉ **Arthur LOUSSERT**, Understanding and guiding the computing resource management in a runtime stacking context, université de Bordeaux.
- ✉ **Pierre MINVIELLE-LARROU**, Méthodes de simulation stochastique pour le traitement de l'information, université de Pau et des pays de l'Adour.
- ✉ **Fotios NIKOLAIDIS**, Tromos: A software development kit for virtual storage systems, université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.
- ✉ **Raphaël PRAT**, Répartition dynamique de charge sur accélérateurs pour les applications de dynamique moléculaire, université de Bordeaux.

MÉCANIQUE ET THERMIQUE

- ✉ **Thomas ELIA**, Étude théorique et expérimentale de l'amorçage par choc et de la détonation de compositions énergétiques intégrant des additifs oxydants et métalliques réactifs, Institut polytechnique de Paris.
- ✉ **Marie GORECKI**, Amélioration de la modélisation physico-numérique de l'endommagement et de la rupture de la matière sous choc, École centrale de Nantes.
- ✉ **Cyprien HEISEL**, Conception et réalisation par fabrication additive de matériaux cellulaires architecturés, université de Limoges.
- ✉ **Laurent LACOURT**, Étude numérique de la nocivité des défauts dans les soudures, Mines ParisTech.
- ✉ **Mathieu XAVIER**, Étude analytique et numérique du développement de la striction multiple pour des cylindres métalliques en expansion dynamique, université de Lorraine.

OPTIQUE ET OPTRONIQUE

- ✉ **Marine CHOREL**, Étude des traitements multicouches utilisés dans un environnement à très faible hygrométrie sur les installations laser de puissance, université de Bordeaux.
- ✉ **Maxime DULUC**, Études des propriétés statistiques d'une tache focale laser lissée et de leur influence sur la rétrodiffusion Brillouin stimulée, université de Bordeaux.
- ✉ **Diane STOFFEL**, Caractérisation du matériau Nd:Lu:CaF₂ pour l'amplification laser à 1053 nm, université de Bordeaux.
- ✉ **Florian TOURNEMENNE**, Impact des défauts d'aspect sur la propagation d'un laser de puissance, université de Bordeaux.
- ✉ **Matthieu VEINHARD**, Endommagement surfacique de la silice avec des faisceaux laser de type LMJ, université Aix-Marseille.

PHYSIQUE DU NOYAU, ATOME, MOLÉCULE, PLASMAS

- ✉ **Jérémy DECHARD**, Sources térahertz produites par impulsions laser ultra-intenses, université Paris-Saclay.
- ✉ **Antoine GINTRAND**, Modélisation analytique et numérique de l'évolution des restes de supernova en phase radiative, université Paris sciences et lettres.
- ✉ **Thomas LAHENS**, Propagation d'un faisceau d'électrons relativistes intense de radiographie éclair dans un plasma froid, université de Bordeaux.
- ✉ **Thibault MICHEL**, Étude des chocs radiatifs dans le cadre de l'astrophysique de laboratoire, université Paris-Saclay.
- ✉ **Alisée NGUYEN**, Contrôle de rayonnements térahertz intenses par lasers femtosecondes et application à la détection de molécules, université Paris-Saclay.
- ✉ **Ricardo PEREZ-SANCHEZ**, La méthode de substitution appliquée au ²⁴⁰Pu, université de Bordeaux.

- ✉ **Julien RIPOCHE**, Projected Bogoliubov many-body perturbation theory: Overcoming formal and technical challenges, université Paris-Saclay.
- ✉ **Jocelain TRELA**, Effet des électrons chauds sur l'hydrodynamique des chocs et implosions pour l'allumage par choc, université de Bordeaux.
- ✉ **Arno VANTHIEGEN**, Theoretical and numerical studies of relativistic collisionless shock waves, Sorbonne Université.

THERMOHYDRAULIQUE ET MÉCANIQUE DES FLUIDES

- ✉ **Xavier LAMBOLEY**, Apparition de rugosités de surface lors de l'ablation d'un matériau composite en régime de transition entre laminaire et turbulent, université de Bordeaux.
- ✉ **Maéva MAZIA-MIKART**, Capture par mousse aqueuse de particules micrométriques dispersées par explosif – Étude expérimentale et numérique, ISAE-ENSA.
- ✉ **Grégoire VARILLON**, Non-modal hydrodynamic stability analysis of ablation flows relative to inertial confinement fusion, université Paris-Saclay.
- ✉ **Giovanni VICICONTE**, Mélange turbulent contrôlé par effets de densité variable et coefficients de transport, École centrale de Lyon.

INSTRUMENTATION, MÉTROLOGIE ET CONTRÔLE

- ✉ **Édouard ROLLIN**, Développement de l'analyse élémentaire directe pour le contrôle de procédés d'élaboration de matériaux nucléaires, université Bourgogne Franche-Comté.
- ✉ **Benoît ROUGIER**, Étude à cœur des propriétés de matériaux innovants par la compréhension de la propagation de l'onde électromagnétique à travers l'onde de choc dans la gamme de fréquence 1 GHz-3 THz, université Paul-Sabatier Toulouse III.
- ✉ **Nicolas SCHMITT**, Faisabilité et réalisation d'un détecteur silicium-électrode diamant CVD pour la spectrométrie α en milieu liquide, université Bourgogne Franche-Comté.
- ✉ **Vincent THOMAS**, Développement d'un système de mesure ultracompact à coïncidence électron/photon pour la mesure et la caractérisation des Xe, université Paris-Saclay.

TECHNOLOGIES MICRO ET NANO

- ✉ **Thibaut PARUIT**, Développement de membranes hybrides nanocomposites pour électrolyseur PEM, université d'Orléans.

ÉLECTROMAGNÉTISME, GÉNIE ÉLECTRIQUE

- ✉ **Tristan GOURIOU**, Étude de la génération d'impulsions électromagnétiques produites par claquages de matériaux diélectriques induits par irradiation par flux d'électrons, université Paul-Sabatier Toulouse III.
- ✉ **Thomas HURET**, Méthode d'estimation des valeurs extrêmes des distributions de contraintes induites et de seuils de susceptibilité dans le cadre des études de durcissement et de vulnérabilité aux menaces électromagnétiques intentionnelles, université Bretagne-Loire.
- ✉ **Simon LOILLIER**, Modèles perturbatifs en électromagnétisme – Application au problème inverse en matériaux, université de Rennes.
- ✉ **Jérémie-Marie PLEWA**, Étude de l'influence des plasmas dans les diodes à électrons pour la radiographie éclair, université Paul-Sabatier Toulouse III.
- ✉ **Guillaume MEJECAZE**, Modélisation de la susceptibilité électromagnétique des étages d'alimentation d'équipements électroniques en mode conduit, université de Bordeaux.

CHIMIE

- ➔ **Guillaume BAILLY**, Développement et application de la fluorescence X-raies L pour l'analyse en ligne de solutions d'actinides, CEA – Valduc.
- ➔ **Charlène DELACOTTE**, Optimisation d'isolants haute température limitant le transfert thermique par rayonnement, CEA – Le Ripault.
- ➔ **Brendan HUITOREL**, Développement de matériaux composites graphite/polymère injectables à forte conductivité thermique et électrique : Application à la mise en œuvre de plaques bipolaires composites pour pile à combustible, CEA – Le Ripault.
- ➔ **Maxime LAGNY**, Recherche et développement de procédés de traitement chimique contrôlés pour des optiques laser de grandes dimensions, CEA – Le Ripault.

COMPOSANTS ET ÉQUIPEMENTS ÉLECTRONIQUES

- ➔ **Alexandre SONNETTE**, Caractérisation des puces de microspectromètre de masse, CEA – DAM Île-de-France.

SCIENCES DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT

- ➔ **Magali RIESNER**, Contrôle structural des paléoséismes et grands séismes historiques sur failles chevauchantes, CEA – DAM Île-de-France.
- ➔ **Viviane SOUTY**, Développement d'une approche probabiliste pour les tsunamis d'origine sismique le long des côtes méditerranéennes françaises, CEA – DAM Île-de-France.

MATÉRIAUX, PHYSIQUE DU SOLIDE

- ➔ **Loïck BONNET**, Cristallogénèse de cristaux pour l'optique non linéaire, CEA – Le Ripault.
- ➔ **Nils BROUWER**, Simulation ab initio de la fusion induite par laser, CEA – DAM Île-de-France.
- ➔ **Nicolas BRUZY**, Héritage de la transformation plastique lors de transitions de phase polymorphiques dans le fer, CEA – DAM Île-de-France.
- ➔ **Mattéo BRYCKAERT**, Étude in situ des mécanismes d'adsorption de molécules gazeuses et d'apparition de produits de corrosion sur matériaux métalliques par spectroscopie infrarouge PM-IRRAS, CEA – Valduc.
- ➔ **Régnald CHALAYER**, Simulation de la transition choc-détonation dans un explosif faiblement poreux, CEA – Le Ripault.

➔ **David DROUET**, Déformation dynamique des matériaux granulaires : Influence des hétérogénéités locales sur le champ de température, CEA – Le Ripault.

➔ **Gautier LECOUTRE**, Étude par dynamique moléculaire du comportement mécanique de polymères, CEA – DAM Île-de-France.

➔ **Jean-Antoine QUEYROUX**, Thermodynamique des produits de détonation en cellules à enclumes de diamant, CEA – DAM Île-de-France.

MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE SCIENTIFIQUE, LOGICIEL

➔ **Charles COLAVOLPE**, Résolution numérique de systèmes de type chaleur hyperbolique pour la turbulence sur maillage non structuré, CEA – DAM Île-de-France.

➔ **Théo COROT**, Tension de surface en référentiel ALE pour des schémas colocalisés, CEA – DAM Île-de-France.

➔ **Justine LABAT**, Mise au point de méthodes de décomposition de domaines dans un code 3D de furtivité électromagnétique, CEA – Cesta.

➔ **Nicolas PETON**, Modélisation et simulation rapide des ondes de souffle, CEA – DAM Île-de-France.

➔ **Corentin PRIGENT**, Homogénéisation de domaine volumique de matériaux hétérogènes, CEA – Cesta.

➔ **Anna-Maria VINTESCU**, Génération automatique de maillages structurés d'ordre élevé, CEA – DAM Île-de-France.

MÉCANIQUE ET THERMIQUE

➔ **Eileen BOISSIN**, Conception et simulation d'une structure métallique autoamortie issue des filières de fabrication additive, CEA – Cesta.

➔ **Benjamin JODAR**, Modélisation et simulation des impacts hypervéloces, CEA – Cesta.

OPTIQUE ET OPTRONIQUE

➔ **Alexandre BEAUDIER**, Effet du vide sur les performances de composants optiques traités sol-gel, CEA – Cesta.

➔ **Cyril BERNERD**, Étude d'un amplificateur laser 1 J 10 Hz, CEA – Cesta.

➔ **Élodie BOURSIER**, Diagnostic fibré d'élargissement spectral pour le LMJ, CEA – Cesta.

➔ **Manon LAMY**, Simulation d'un amplificateur laser 1 J 10 Hz, CEA – Cesta.

THERMOHYDRAULIQUE ET MÉCANIQUE DES FLUIDES

➔ **Yann DAUVOIS**, Modélisation d'écoulements de gaz raréfiés à haute température pour la rentrée atmosphérique, CEA – Cesta.

➔ **Cyril LEVET**, Récession et morphologie de surface de matériaux ablatés en conditions extrêmes, CEA – Cesta et Laboratoire des composites thermostructuraux (LCTS).

➔ **Sylvain MORILHAT**, Modélisation et simulation d'écoulements transitionnels en régime hypersonique, CEA – Cesta.

➔ **Gwenc'hlan TYMEN**, Modélisation et simulation d'écoulements multiphasiques en régime supersonique, CEA – Cesta.

PHYSIQUE DU NOYAU, ATOME, MOLÉCULE, PLASMAS

➔ **David BLACKMAN**, Théorie cinétique et simulations numériques d'onde plasma comportant un moment angulaire orbital, CEA – Cesta et Centre lasers intenses et applications (Celia).

➔ **Luke CEURVORST**, Expériences d'instabilité Rayleigh-Taylor ablative fortement non linéaire sur le NIF, CEA – Cesta et Centre lasers intenses et applications (Celia).

➔ **Adrien FUSARO**, Optimisation du lissage optique pour maîtriser la propagation des faisceaux laser dans les plasmas chauds, CEA – DAM Île-de-France.

➔ **Julien MOREAU**, Étude d'un dispositif compact destiné à accélérer et focaliser des protons par voie laser, CEA – Cesta.

G. Duchateau, A. Pineau, B. Chimier,
A. Casner, V. Tikhonchuk
Centre lasers intenses et applications
(Celia), UMR 5107 CNRS – CEA –
Université de Bordeaux, Talence

S. X. Hu, A. Kar, V. N. Goncharov,
P. B. Radha, E. M. Campbell
Laboratory for Laser Energetics
(LLE), université de Rochester,
États-Unis

MODÉLISATION DE LA TRANSITION DU SOLIDE AU PLASMA POUR LA FCI EN ATTAQUE DIRECTE

En irradiant une cible de plastique par une impulsion laser représentative de celles utilisées pour la fusion par confinement inertiel (FCI) en attaque directe (schéma où la cible est irradiée directement), des expériences récentes ont montré que l'état solide initial influence la compression ultérieure de la cible. Afin de rendre compte de cette influence, le Celia, en collaboration avec le LLE de l'université de Rochester, aux États-Unis, a développé un modèle microscopique de la transition du solide au plasma. Les résultats montrent que cette transition a lieu sur une échelle de temps d'environ 100 picosecondes, non négligeable devant les temps caractéristiques de la FCI **1**. L'état solide étant transparent au rayonnement laser, on montre également que le combustible deutérium-tritium peut être affecté par cet état initial qui n'est pas pris en compte à l'heure actuelle dans les codes de calcul. Cet effet peut expliquer en partie que l'efficacité escomptée du schéma de FCI en attaque directe n'est que partiellement atteinte.

La fusion par confinement inertiel (FCI) repose sur l'utilisation de lasers de puissance capables de délivrer une énergie de l'ordre du mégajoule (10^6 joules) sur une cible sphérique de deutérium-tritium (DT). La cible est souvent enrobée d'une couche de plastique (CH, matériau diélectrique), dite ablateur. L'ablation par le laser de cette couche externe donne lieu à la compression de la cible par effet dit fusée, générant après quelques nanosecondes (10^{-9} s) les conditions de température et de pression permettant d'amorcer les réactions de fusion nucléaire. Malgré l'atteinte de performances laser extrêmes sur diverses installations, la fusion avec le gain espéré n'a pas encore été réalisée, alors que les codes de calcul la prédisent. Une des pistes principales expliquant cet écart concerne la non-uniformité de l'éclairement. Cette dernière excite des instabilités hydrodynamiques dites de Rayleigh-Taylor qui dégradent fortement la symétrie sphérique de la cible; l'efficacité du confinement inertiel s'en trouve alors diminuée. Il a été montré récemment que l'état solide initial de la cible amplifie ces non-uniformités de façon non linéaire **1,2**. À l'heure actuelle, les codes de calcul hydrodynamique dédiés à la modélisation de la FCI supposent un état plasma dès le début de l'interaction; ils ne sont ainsi pas en mesure de rendre compte de ces observations expérimentales **2**.

Dans ce contexte, le Celia, en collaboration avec le LLE, a développé un modèle microscopique qui permet de

rendre compte de la transition du solide au plasma de l'ablateur du point de vue de ses propriétés optiques **1**. Ce modèle décrit principalement les processus physiques suivants: la photo-ionisation et l'ionisation dite par impact, les collisions électroniques, l'absorption de l'énergie laser et l'évolution des températures électroniques et ioniques. La **figure 1** montre l'évolution temporelle des grandeurs physiques d'intérêt à la surface de la cible, occasionnée par une impulsion laser représentative d'une préimpulsion (*picket*) utilisée pour la FCI en attaque directe, telle que celle délivrée par le laser Omega au LLE à Rochester, aux États-Unis. Il apparaît que la densité d'électrons libres atteint la densité critique plasma (densité pour laquelle la matière devient opaque au rayonnement) sur une échelle de temps d'environ 100 picosecondes (100×10^{-12} s). En effet, au bout de ce laps de temps, la fréquence de collision électronique augmente fortement, ce qui entraîne une forte absorption du laser et une large augmentation de la température électronique. Comme le couplage électrons-ions devient également fort, la température des ions croît rapidement, entraînant des changements de phase de la matière. On peut extraire de ce modèle la pression électronique générée 8 micromètres à l'intérieur de la cible, c'est-à-dire à la position de l'interface entre l'ablateur CH et le combustible DT. Par ailleurs, on a également évalué le profil de pression transverse causé par une inhomogénéité d'irradiation de taille caractéristique 1 micromètre (*speckle*) au moment

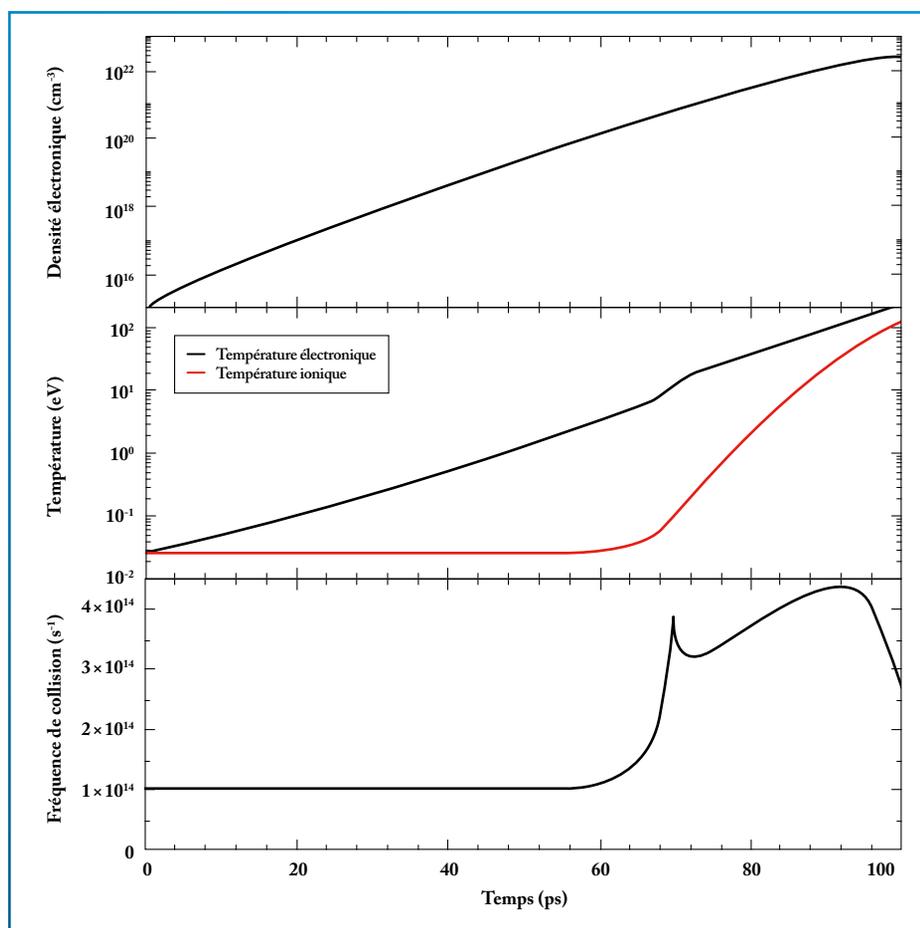


Figure 1

➔ Évolution temporelle de la densité d'électrons libres, de la température et de la fréquence de collision à la surface de l'ablateur, occasionnée par une impulsion laser gaussienne de 100 ps avec une intensité maximale de 10^{14} W/cm², représentative de la préimpulsion utilisée en FCI. Lorsque la densité électronique devient de l'ordre de la densité critique (près de 10^{22} cm⁻³), la température augmente fortement, ce qui entraîne des transitions de phase. Le temps de transition du solide au plasma est ainsi de l'ordre de 100 ps, un temps qui n'est pas négligeable devant les temps caractéristiques de la FCI. Comme cet état initial solide n'est pas pris en compte dans les codes de calcul, on peut de cette manière expliquer en partie que l'efficacité escomptée du schéma de FCI n'est que partiellement atteinte.

où la matière devient opaque. On constate que la pression peut être de l'ordre du gigapascal (10^9 Pa) ou supérieure, avec un profil spatial différent de celui de l'inhomogénéité d'irradiation, rendant compte d'une absorption non linéaire comme observé [2], cette non-linéarité étant la signature de l'état solide initial.

Les résultats principaux de ces travaux sont les suivants. (i) Le temps de transition du solide au plasma n'est pas négligeable devant les échelles de temps caractéristiques de la FCI, ce qui confirme le rôle de l'état solide initial. (ii) Des température et pression significatives sur l'interface de l'ablateur et du combustible peuvent dégrader ce dernier : une onde de choc peut créer des fractures et le combustible peut se détacher de l'ablateur sous l'effet de la température. (iii) L'ablateur reste transparent tant que l'intensité laser n'est pas suffisante. Cela est dû au fait que c'est un processus d'absorption non linéaire (deux photons) qui donne lieu à l'ionisation de l'ablateur.

L'énergie transmise dans le combustible avant que l'ablateur devienne opaque est alors de l'ordre de 1 J. En ne supposant qu'une absorption moyenne de 10 % de cette énergie, cela dégrade l'état du combustible DT. La cible se trouve alors dans un état différent de celui qui a été conçu pour optimiser le schéma de FCI.

Pour conclure, l'ensemble de ces résultats montre clairement que l'on peut s'attendre à une influence significative de l'état

solide initial sur l'absorption du laser par la cible, et à des modifications significatives du combustible DT, altérant l'efficacité du schéma de fusion par confinement inertiel en attaque directe. Ce modèle microscopique a récemment été introduit dans un code hydrodynamique 1D. Les premiers résultats obtenus confirment l'importance de prendre en compte la transition du solide au plasma dans les simulations d'expériences de FCI.

RÉFÉRENCES

- [1] G. DUCHATEAU, S. X. HU, A. PINEAU, A. KAR, B. CHIMIER, A. CASNER, V. TIKHONCHUK, V. N. GONCHAROV, P. B. RADHA, E. M. CAMPBELL, « Modeling the solid-to-plasma transition for laser imprinting in direct-drive inertial confinement fusion », *Phys. Rev. E*, **100**, 033201 (2019).
- [2] J. L. PEEBLES, S. X. HU, W. THEOBALD, V. N. GONCHAROV, N. WHITING, P. M. CELLERS, S. J. ALI, G. DUCHATEAU, E. M. CAMPBELL, T. R. BOEHLY, S. P. REGAN, « Direct-drive measurements of laser-imprint-induced shock velocity nonuniformities », *Phys. Rev. E*, **99**, 063208 (2019).

S. Depierreux, C. Neuville, V. Tassin,
M. Casanova, A. Debayle, P.-É. Masson-Laborde
CEA – DAM Île-de-France

C. Labaune
Laboratoire pour l'utilisation des lasers
intenses (Luli), École polytechnique, Palaiseau

V. Tikhonchuk
Centre lasers intenses et applications (Celia),
université de Bordeaux, Talence

D. Pesme, S. Hüller
Centre de physique théorique,
École polytechnique, Palaiseau

W. Seka, R. E. Bahr
Laboratory for Laser Energetics,
Rochester, New York, États-Unis

MISE EN ÉVIDENCE EXPÉRIMENTALE D'INSTABILITÉS LASER-PLASMA MULTIFAISCEAUX COLLECTIVES

Sur l'installation Laser Mégajoule, l'énergie est délivrée sous la forme de multiples faisceaux laser, distribués en cônes de façon à irradier l'intérieur d'une cavité en or le plus symétriquement possible.

Cette configuration d'irradiation favorise de nouvelles géométries pour le développement des instabilités de couplage non linéaire entre les faisceaux laser et le plasma. Deux expériences 1 réalisées par le CEA – DAM Île-de-France et ses collaborateurs sur l'installation Omega, au Laboratory for Laser Energetics, aux États-Unis, ont mis en évidence pour la première fois l'existence de telles instabilités multifaisceaux, démontrant la nécessité de prendre en compte les pertes d'énergie associées dans le bilan d'énergie absorbée par la cible.

Les éclairagements laser atteints sur le Laser Mégajoule nécessitent de considérer les mécanismes non linéaires de mélange d'ondes lors de la propagation des faisceaux dans les plasmas produits. Ces mécanismes produisent de nouvelles ondes, dites ondes filles, aux fréquences de battement ($\omega_0 \pm \omega_p$, où ω_0 désigne la fréquence du laser et ω_p la fréquence d'une onde dans le plasma). Le couplage résonant de ces ondes filles avec le laser incident peut devenir instable, entraînant une perte d'énergie – jusqu'à plusieurs dizaines de pour cent – via la diffusion de lumière vers l'extérieur du plasma. Selon que l'instabilité implique les électrons seuls, ou les électrons et les ions du plasma, on parlera de diffusion Raman ou Brillouin stimulée.

L'interaction d'un seul faisceau laser avec un plasma homogène produit principalement ces instabilités en retour du laser incident. Dans les années 1990 2, il avait été envisagé théoriquement que cela puisse être profondément modifié dans les zones de recouvrement des faisceaux lorsque ceux-ci sont distribués en cônes (les différents faisceaux se propagent à la surface d'un cône virtuel et se superposent au sommet du cône où on place la cible [figure 1a]). Dans ce cas de distribution symétrique des lasers, il existe une direction privilégiée, l'axe du cône de faisceaux, selon laquelle tous les faisceaux stimulent une onde fille unique, partagée par tous les faisceaux, avec une géométrie commune. Comme l'éclairage laser total résultant de la

superposition des faisceaux peut atteindre quelque $10^{16} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ au sein d'un large volume de plusieurs millimètres cubes pour les expériences à l'échelle du mégajoule, les amplifications attendues, si ces mécanismes existent, sont élevées. Cependant, ces instabilités multifaisceaux n'avaient jamais pu être mises en évidence expérimentalement.

Deux expériences 1 ont été définies et réalisées par le CEA – DAM Île-de-France et ses collaborateurs sur l'installation Omega, à Rochester, aux États-Unis, démontrant expérimentalement pour la première fois l'existence de telles instabilités, dites collectives à plusieurs faisceaux. Ces expériences exploitent la flexibilité d'Omega en matière de géométrie des faisceaux et d'implantation des diagnostics.

La première expérience 3 utilise 12 faisceaux laser répartis en deux cônes incidents de part et d'autre d'un disque cible (figure 1a) constitué d'un matériau de faible densité (7 mg/cm^3), appelé mousse, obtenu par l'agencement de fibres et de vides d'échelle micrométrique. Aux éclairagements laser utilisés, la mousse est ionisée par les 12 faisceaux en moins de 0,5 ns pour former un plasma présentant un profil exponentiel de densité en détente le long de l'axe initial de la cible, noté z. À cette inhomogénéité correspond une variation de la fréquence ω_p selon z qui limite les possibilités de couplage résonant et l'amplification Raman dans cette direction. En revanche, grâce à l'irradiation par 12 faisceaux laser, le plasma est quasiment homogène dans un plan transverse à l'axe z,

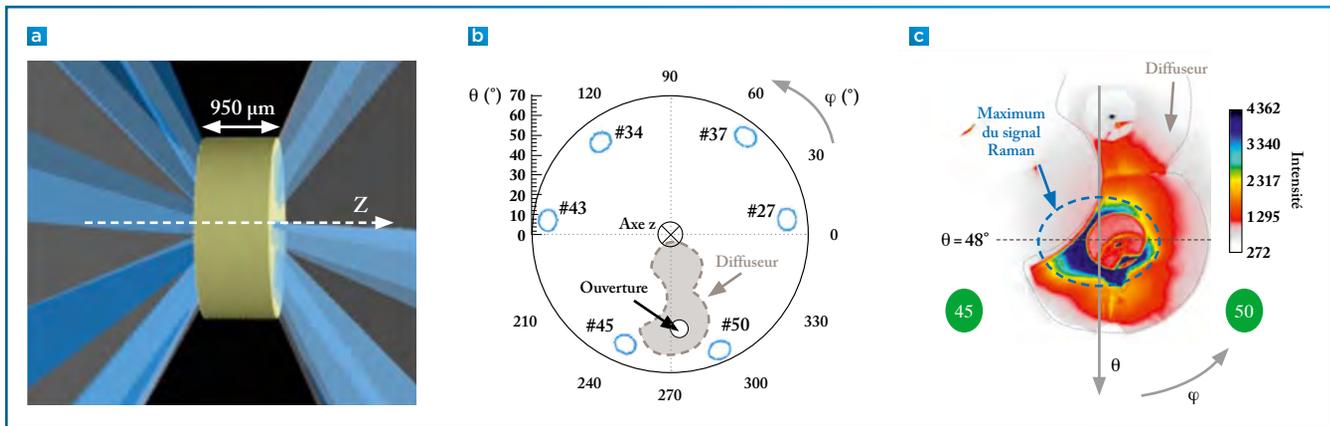


Figure 1

➔ (a) Représentation schématique des deux cônes de six faisceaux incidents sur la cible. (b) Distribution angulaire (coordonnées sphériques autour de l'axe z) du cône de faisceaux incidents par la gauche de la cible en (a) et géométrie du diffuseur dont la forme épouse la place disponible dans l'enceinte expérimentale compte tenu des ouvertures pour les autres faisceaux (60 au total sur Omega) et pour les diagnostics. (c) Image expérimentale de la distribution angulaire du signal Raman : l'intensité, en fausses couleurs, présente un maximum autour du plan bissecteur des faisceaux #45 et #50 au voisinage de la direction $\theta = 48^\circ$, ce qui prouve l'existence d'une instabilité collective à deux faisceaux.

favorisant une diffusion Raman élevée dans les directions normales à cet axe. Lorsque cette diffusion Raman est collective à deux faisceaux, elle se produit, de plus, dans leur plan bissecteur. Expérimentalement, un diagnostic sur Omega réalise l'image de panneaux de matériau diffuseur disposés au sein de l'enceinte expérimentale dans et autour du plan bissecteur, au voisinage de $\varphi = 270^\circ$ sur la **figure 1b**, de deux faisceaux adjacents parmi les 12 (faisceaux #45 et #50). L'image expérimentale du diffuseur est présentée sur la **figure 1c**. On y observe nettement un maximum du signal Raman diffusé au voisinage de la direction $\theta = 48^\circ$ dont l'interprétation est la suivante : dans leur volume de superposition, les faisceaux #45 et #50 stimulent une même onde électromagnétique Raman émise dans leur plan bissecteur à un angle d'environ 90° par rapport à l'axe z. Au cours de sa propagation vers l'extérieur du plasma, cette lumière Raman est réfractée dans les plans de densité constants successifs depuis sa direction initiale voisine de 90° de l'axe z vers une direction à environ 48° de cet axe. La détection expérimentale d'un maximum de signal Raman autour de ($\theta = 48^\circ$, $\varphi = 270^\circ$) (**figure 1c**) démontre bien ainsi l'existence d'une instabilité collective à deux faisceaux.

La seconde expérience **4** utilise 40 des 60 faisceaux d'Omega pour irradier une cavité en or dans une géométrie représentative du Laser Mégajoule. Elle

a permis de démontrer l'amplification d'une instabilité Brillouin collective à 10 faisceaux. Ces expériences sont à l'origine d'un programme expérimental pluriannuel et de nouveaux codes de calcul pour l'interaction.

Ces expériences ont mis en évidence pour la première fois l'existence d'instabilités laser-plasma collectives à plusieurs faisceaux laser dont les conséquences sont multiples. D'une part, les niveaux attendus pour la lumière diffusée sont souvent élevés – plusieurs dizaines de pour cent car l'amplification est déterminée par l'éclairement total résultant de leur superposition. D'autre part, du fait de leur géométrie, ces instabilités collectives produisent de la lumière diffusée dans de multiples direc-

tions parfois éloignées des diagnostics habituels installés en rétrodiffusion des lasers. Ces mécanismes sont désormais pris en compte pour la conception de nouveaux diagnostics plasma destinés au Laser Mégajoule.

REMERCIEMENTS

La première expérience **3** a été cofinancée par le projet ANR ILPHYGERIE (ANR-12-BS04-0006-01). Ce travail a été réalisé en collaboration avec M.-C. Monteil, P. Fremerye, F. Philippe, P. Seytor, D. Teychenné, P. Loiseau, G. Tran, C. Baccou, C. Riconda, A. Colaitis, G. Duchateau, P. Nicolai, A. Héron, N. Borisenko, L. Borisenko, A. Orekhov, J. Katz et C. Stoeckl.

RÉFÉRENCES

- 1** S. DEPIERREUX *et al.*, « Experimental investigation of the collective stimulated Brillouin and Raman scattering of multiple laser beams in inertial confinement fusion experiments », *Plasma Phys. Control. Fusion*, **62**, 014024 (2019).
- 2** D. F. DUBOIS *et al.*, « Collective parametric instabilities of many overlapping laser beams with finite bandwidth », *Phys. Fluids*, **B4**, p. 241 (1992).
- 3** S. DEPIERREUX *et al.*, « Experimental investigation of the collective Raman scattering of multiple laser beams in inhomogeneous plasmas », *Phys. Rev. Lett.*, **117**, 235002 (2016).
- 4** C. NEUVILLE *et al.*, « Experimental evidence of the collective Brillouin scattering of multiple laser beams sharing acoustic waves », *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 235002 (2016).

MODÉLISATION DES PROFILS DE RAIE DE L'HYDROGÈNE POUR LE DIAGNOSTIC SPECTROSCOPIQUE DES PLASMAS DENSES

Il est possible d'estimer la température et la densité d'un plasma d'hydrogène en analysant son spectre d'émission. Cette méthode est très utilisée pour caractériser à distance des plasmas astrophysiques (milieu interstellaire, étoiles) ou des plasmas créés artificiellement en laboratoire (par exemple lors des expériences sur le Laser Mégajoule du CEA – DAM). Ce diagnostic repose sur la mesure d'un élargissement spectral dominé par l'effet Stark, c'est-à-dire lié à l'influence des champs électriques générés par les ions et les électrons du plasma. Une description simplifiée de cet élargissement constitutif du profil de raie est proposée au CEA – DAM Île-de-France pour l'atome d'hydrogène et plus généralement pour des ions hydrogénoïdes (ions à un électron lié). Cette modélisation rapide et précise facilite le diagnostic des plasmas **1,2**.

La caractérisation des conditions thermodynamiques de la matière portée à l'état de plasma est primordiale pour tester et discriminer les modèles physiques développés dans le cadre du programme Simulation du CEA – DAM. Cela nécessite notamment de pouvoir accéder à la densité et à la température du milieu dense et chaud, supposé homogène, sans recours aux simulations hydrodynamiques. Dans nos applications, ce plasma est créé artificiellement en laboratoire auprès d'installations comme le Laser Mégajoule au CEA-Cesta, près de Bordeaux, le laser Omega à Rochester, aux États-Unis, le laser Luli 2000 à Palaiseau ou encore la machine Z-pinch des laboratoires Sandia à Albuquerque, aux États-Unis (collaboration DAM-NNSA *Basic*

Science) **3**. Le diagnostic du plasma repose souvent sur l'analyse spectroscopique des profils de raie d'éléments légers élargis par effet Stark. En effet, un atome qui émet du rayonnement peut être perturbé par les interactions électromagnétiques avec les charges en mouvement dans le plasma, ce qui aboutit à une modification des spectres (décalage, élargissement) très sensibles aux conditions thermodynamiques du plasma; la **figure 1** schématise les interactions existant dans un plasma d'hydrogène. Le calcul théorique du spectre d'émission d'un plasma soumis à l'effet Stark est néanmoins un sujet complexe et très coûteux en temps de calcul. Une modélisation rapide et précise de l'effet Stark est donc souhaitable pour faciliter l'analyse spectroscopique des plasmas.

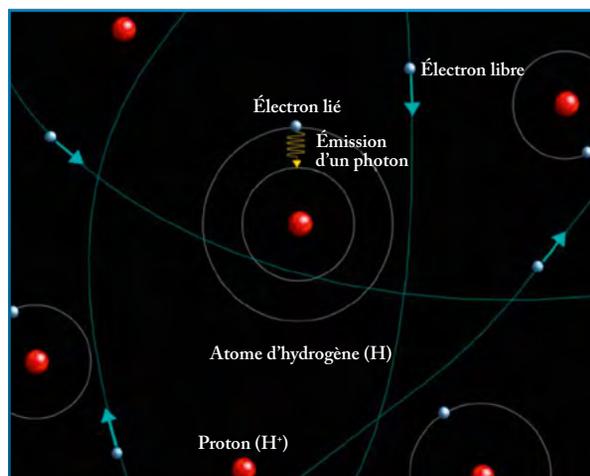


Figure 1

➔ Dans un plasma d'hydrogène, chaque émetteur de rayonnement est soumis aux champs électriques quasi statiques des protons (en rouge) et aux champs électriques dynamiques des électrons (trajectoires classiques représentées en cyan). Tout électron libre peut parfois pénétrer l'extension spatiale de l'émetteur (au centre de l'image), ce qui a tendance à réduire l'élargissement Stark par rapport à une situation ne prenant pas en compte cet effet.

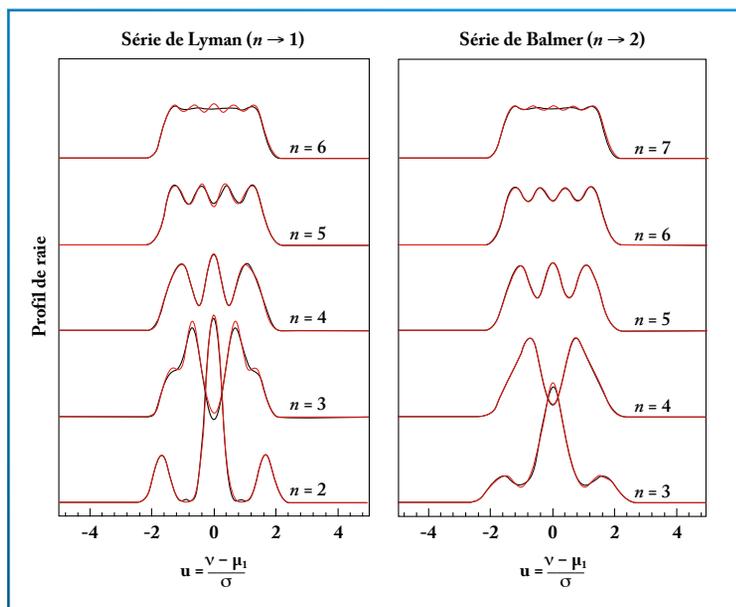


Figure 2

➔ Spectres d'émission (transition $n \rightarrow n'$) d'un système atomique à un électron lié, de numéro atomique Z , placé dans un champ électrique constant d'intensité F . On note que les distributions statistiques (courbes noires), modélisées à partir des moments calculés analytiquement pour (a) les séries de Lyman ($n' = 1$) et (b) de Balmer ($n' = 2$), sont en bon accord avec les calculs exacts raie par raie (courbes rouges), plus coûteux de plusieurs ordres de grandeur en temps de calcul. Les fréquences de photons ν sont centrées et adimensionnées avec :

$$\mu_1 = \frac{Z^2}{n'^2} - \frac{Z^2}{n^2} \text{ et } \sigma^2 = \frac{3F^2}{4Z^2} [(n^2 - n'^2)^2 - n^2 - n'^2].$$

En général, le calcul de l'élargissement Stark repose sur une modélisation quantique des atomes émetteurs de rayonnement, une description classique des trajectoires des particules perturbatrices (c'est-à-dire les ions et électrons voisins de l'émetteur) et la théorie des perturbations dépendant du temps pour modéliser les interactions entre émetteurs et perturbateurs. Les ions étant lourds, ils peuvent être considérés comme quasi immobiles pendant le processus d'émission du rayonnement, tandis que les électrons, plus légers, sont traités dans une approximation de collisions rapides. Le calcul de l'effet Stark se scinde alors en deux problèmes indépendants : le calcul du spectre de l'émetteur soumis à une distribution de champs électriques statiques créés par les ions et le calcul d'un élargissement homogène lié aux champs électriques dynamiques générés par les électrons. Il est également possible d'inclure des corrections liées à d'autres effets, comme la dynamique des ions ou les interactions multipolaires.

Une simplification supplémentaire apparaît dans le cas où le plasma n'est composé que d'atomes ou d'ions à un électron lié (atome d'hydrogène ou ion hydrogénoïde de numéro atomique Z). En effet, en l'absence de champs électriques extérieurs, la proba-

bilité de présence de l'électron lié (notion de fonction d'onde) est calculable analytiquement en tout point et à chaque instant, et les niveaux d'énergie sont regroupés en couches caractérisées par un seul nombre quantique appelé principal et noté n (entier supérieur ou égal à 1). La présence d'un champ électrique a pour conséquence de lever la dégénérescence des niveaux d'énergie et d'induire des transitions radiatives auparavant impossibles entre ces niveaux. Lorsque le spectre d'émission implique des transitions radiatives entre niveaux de deux couches distinctes $n \rightarrow n'$, il est d'usage de nommer les profils de raie correspondants d'après leur découvreur : on parle, par exemple, des séries de Lyman (pour $n' = 1$ et $n \geq 2$) et de Balmer (pour $n' = 2$ et $n \geq 3$). En appliquant la théorie des perturbations pour traiter l'effet Stark et en utilisant les fonctions d'onde analytiques, il est possible de caractériser le profil de raie à l'aide d'un développement en moments, lesquels s'expriment comme combinaisons de polynômes de Bernoulli [1]. Ces moments ont été calculés analytiquement en coordonnées paraboliques pour les spectres de Lyman ($n \rightarrow 1$) et de Balmer ($n \rightarrow 2$) en fonction du nombre quantique principal n , du numéro atomique Z et de l'intensité F du champ électrique

(voir figure 2). Par ailleurs, l'influence de corrections non linéaires sur l'énergie des niveaux (structure fine, effet Stark quadratique, effet quadrupolaire électrique) a été estimée.

Concernant l'élargissement par collisions électroniques, il est courant de privilégier les interactions dipolaires à longue portée et de négliger la pénétration de tout électron libre dans l'extension spatiale de l'ion émetteur. Pour l'atome d'hydrogène, cela aboutit à une expression logarithmique de l'élargissement électronique qui diverge à faible distance d'approche, nécessitant l'introduction d'un paramètre de coupure. Récemment, une théorie semi-classique incluant les collisions pénétrantes a été développée pour l'hydrogène (ou tout ion hydrogénoïde). Cette théorie ne nécessite pas l'introduction d'une distance minimale d'approche, mais l'élargissement collisionnel est plus complexe à évaluer : il s'exprime en fonction d'une famille d'intégrales calculées à partir d'une relation de récurrence. Il a été prouvé [2] que cette relation de récurrence avait une solution analytique, ce qui a permis d'obtenir une approximation analytique plus simple de l'élargissement par collisions électroniques incluant les effets de pénétration [4]. Ces effets de pénétration, souvent négligés, peuvent pourtant provoquer une diminution de 25 % de l'élargissement Stark par collisions électroniques.

Par la suite, il est envisagé de généraliser le modèle statistique d'effet Stark à des systèmes plus complexes (atomes à deux électrons et plus).

RÉFÉRENCES

- 1 F. GILLERON, J.-C. PAIN, « On the statistical properties of a hydrogenic atom broadened by linear Stark effect », *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **52**, 245001 (2019).
- 2 J.-C. PAIN, F. GILLERON, « Modeling penetrating collisions in the standard line broadening impact theory for hydrogen », *High Energy Density Phys.*, **30**, p. 52 (2019).
- 3 T. NAGAYAMA *et al.*, « Systematic study of L-shell opacity at stellar interior temperatures », *Phys. Rev. Lett.*, **122**, 235001 (2019).
- 4 J.-C. PAIN, F. GILLERON, « Electron broadening operator including penetrating collisions for hydrogen », *Atoms*, **8**, p. 2 (2020).

EFFETS ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET ACOUSTIQUES DES ÉCLAIRS SUR LA TERRE ET DANS L'ESPACE

Les éclairs émettent des ondes électromagnétiques suffisamment puissantes pour interagir avec les électrons piégés par le champ magnétique terrestre et ainsi amoindrir leurs effets dommageables sur tout objet soumis aux flux de ces électrons. Le CEA – DAM Île-de-France s'est attaché à mieux modéliser les ondes des éclairs dans le régime des très basses fréquences électromagnétiques **1**, ainsi que dans le régime acoustique **2**, afin de mieux les comprendre, les identifier à distance, les différencier, les mesurer et prédire leurs effets.

Un éclair est composé de décharges électriques à l'intérieur d'un nuage ou le long d'un ou plusieurs coups de foudre qui touchent le sol, appelés arcs en retour. Les arcs des éclairs émettent des ondes électromagnétiques de très basse fréquence. Ces dernières se propagent depuis leur origine jusqu'à des milliers de kilomètres dans le guide d'onde Terre-ionosphère, par rebonds successifs de l'onde sur la partie dense de

l'ionosphère, entre 0 et 100 km d'altitude. Parfois, pour des raisons mal connues, elles s'échappent jusque dans la magnétosphère terrestre (au-delà de 800 km) où elles suivent les lignes du champ magnétique.

Les électrons issus des éruptions solaires et piégés le long des lignes de champ magnétique terrestre, dans l'espace proche de la Terre, sont sensibles à cette source d'énergie électromagnétique avec laquelle ils peuvent entrer en résonance **3**.

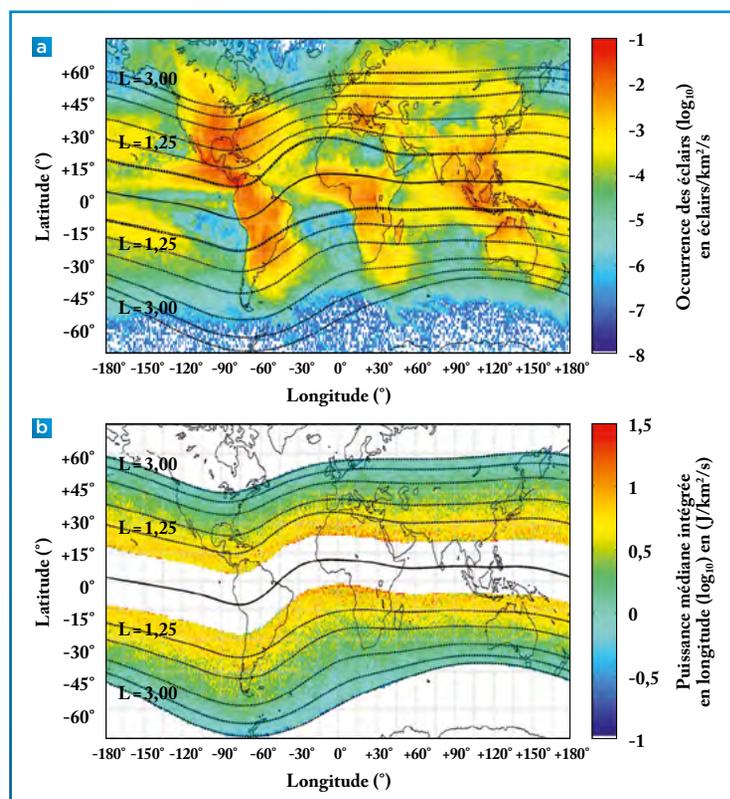


Figure 1
➔ (a) Sur Terre, densité annuelle moyenne des éclairs (source : <http://www.ln.net>) sur laquelle sont représentées les lignes du champ magnétique terrestre projetées à 100 km d'altitude (en noir et notées L). (b) Dans l'espace, la puissance totale P des éclairs (en \log_{10} , en $\text{J}/\text{km}^2/\text{s}$), estimée d'après **1** à partir de (a), et à laquelle est soumis un électron de 1 MeV dérivant autour de la Terre et piégé sur une ligne de champ magnétique à L fixe. Dans l'espace, l'électron subit une puissance électromagnétique relativement homogène pendant sa trajectoire longitudinale et qui décroît selon l'inverse de la distance à l'équateur ($P \propto 1/L$). Cette distribution géographique est très différente de (a) qui montre des zones d'éclairs au-dessus des continents et dans la zone tropicale.

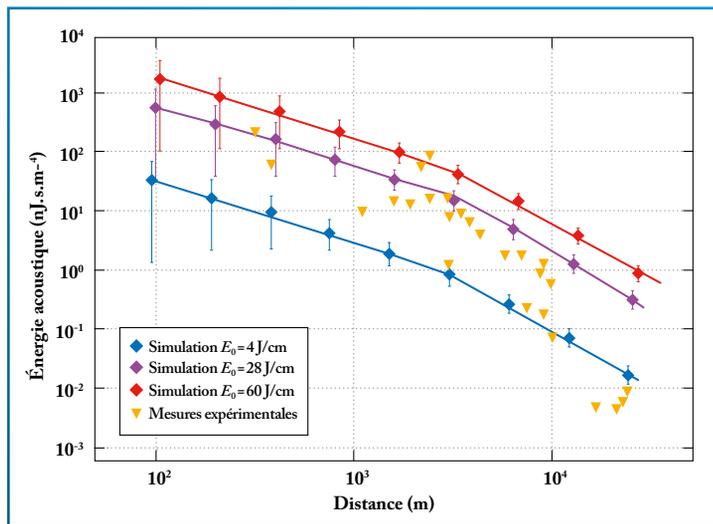


Figure 2

➤ Résultats du modèle d'énergie acoustique **2** qui montrent la décroissance de l'énergie acoustique d'un signal de tonnerre (ramenée à la longueur de l'arc de foudre) mesurée (triangles) et simulée (losanges) pour trois énergies linéiques de l'éclair (E_0), dont une valeur moyenne (28 J/cm, en violet) et deux bornes supérieure (60 J/cm, en rouge) et inférieure (4 J/cm, en bleu). La décroissance de l'énergie acoustique fait apparaître deux régimes de propagation en loi de puissance visibles sur les simulations et les observations : en $1/r$ à moins de 3 km (linéique) puis en $1/r^2$ au-delà (sphérique) **2**.

S'ensuit une diffusion qui infléchit le vecteur vitesse de l'électron jusqu'à le rendre quasi parallèle à la ligne de champ magnétique et à provoquer sa rentrée dans l'ionosphère, où il se recombinera. Les ondes des éclairs pénétrant dans la magnétosphère contribuent ainsi, par diffusion, à vider l'espace de ces électrons énergétiques, diminuant le niveau des radiations qui agressent l'électronique des satellites. Mais quelle est réellement la puissance des éclairs provoquant cet assainissement ? Quelle est sa variabilité géographique ou saisonnière ? Un électron de 1 MeV dérive longitudinalement autour de la Terre en près de vingt minutes, alors que les ondes émises par les éclairs se propagent dans la proche magnétosphère à la vitesse de la lumière sur des milliers de kilomètres. Quelle est la puissance totale ressentie par l'électron ? Ce sont ces questions qui animent l'effort de modélisation **1** qui permettra, à terme, de calculer combien d'électrons sont précipités dans l'ionosphère grâce aux éclairs et, plus largement, d'arriver à corréler la localisation et l'énergie d'un éclair, mesuré sur Terre, aux caractéristiques du signal propagé, atténué puis mesuré dans l'espace.

Pour répondre à ces questions, il est possible d'utiliser une base de données mondiale de mesures terrestres d'éclairs, provenant du World-Wide Lightning Location Network (WWLLN), fournissant la localisation et l'énergie E des éclairs à tout instant et partout dans le monde grâce à 80 stations de mesure. Grâce au

WWLLN, un modèle empirique d'énergie locale est établi à partir de 200 millions d'éclairs enregistrés pendant quatre ans **1** (figure 1a). Après le calcul de l'amortissement dans l'ionosphère et dans l'espace, l'énergie locale de l'éclair est sommée le long des longitudes d'une ligne de champ magnétique donnée. Ces lignes sont projetées à 100 km d'altitude dans l'ionosphère et tracées en noir sur la figure 1, avec les étiquettes $L = 1,25$ à $L = 3$. Ces calculs conduisent à la puissance globale, $P = E/t$, des ondes issues de l'activité orageuse mondiale que subit un électron piégé dérivant autour de la Terre pendant la durée t suivant une valeur donnée de L (figure 1b).

La composante acoustique des éclairs, communément appelée tonnerre, a également été modélisée **2**. Le tonnerre présente généralement une somme de signaux impulsionnels conduisant à des claquements et des grondements. Individuellement, chaque arrivée impulsionnelle est assimilable à une onde de souffle tridimensionnelle de fréquence comprise entre le hertz et quelques centaines de hertz. C'est donc une source naturelle d'ondes infrasonores dont le mécanisme d'émission reste mal compris, dans un contexte où la technologie infrasonore est développée au CEA-DAM Île-de-France et est utilisée dans le Système de surveillance internationale du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires **4**.

Afin de mieux comprendre les mécanismes acoustiques du tonnerre, un nou-

veau modèle théorique d'énergie acoustique incluant la gamme infrasonore a été développé **2**, bien plus complet que les rares modèles existants. Il prend en compte trois éléments essentiels : la géométrie tortueuse de la foudre, la forme de l'onde de pression à la source obtenue à partir de simulations numériques du plasma chaud de l'arc en retour et l'absorption atmosphérique des ondes produites. Le modèle permet de mettre en évidence que la géométrie cylindrique de l'éclair favorise l'émission des infrasons, tandis que la tortuosité apporte une très forte variabilité de l'onde acoustique en champ proche, soit à moins de 3 km de l'éclair. La comparaison statistique des simulations numériques et de mesures réalisées sur le terrain avec un dispositif acoustique dédié, lors de la campagne du projet européen HyMeX dans le sud de la France, montre un bon accord (figure 2). En particulier, le changement de loi de comportement observé est restitué dans les simulations, pour trois valeurs supposées de l'énergie linéique E_0 de l'éclair. Enfin, ces résultats établissent un lien entre l'énergie déposée à la source et l'énergie acoustique, un pas supplémentaire vers la détermination de l'énergie des éclairs par des mesures acoustiques.

RÉFÉRENCES

- 1** J.-F. RIPOLL, T. FARGES, E. H. LAY, G. S. CUNNINGHAM, « Local and statistical maps of lightning-generated wave power density estimated at the Van Allen probes footprints from the World-Wide Lightning Location Network database », *Geophys. Res. Lett.*, **46**, p. 4122-4133 (2019).
- 2** A. LACROIX, F. COULOUVRAT, R. MARCHIANO, T. FARGES, J.-F. RIPOLL, « Acoustical energy of return strokes: a comparison between a statistical model and measurements », *Geophys. Res. Lett.*, **46**, p. 11479-11489 (2019).
- 3** J.-F. RIPOLL *et al.*, « Particle dynamics in the Earth's radiation belts: review of current research and open questions », *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **125**, e2019JA026735 (2020).
- 4** O. GAINVILLE, L. BOSCA, P.-E. BUTHIER, T. FARGES, J.-M. KOENIG, N. LARDJANE, J. RIVIÈRE, « Détection des ondes de souffle acoustiques : du capteur à la simulation numérique », revue *chocs*, **50**, p. 23-30 (2020).

D. Penninckx,
M. Duluc,
A. Bourgade,
A. Chatagnier
CEA – Cesta

P. Loiseau, A. Debayle,
G. Riazuelo, C. Ruyer,
O. Morice, P.-É. Masson-
Laborde, D. Bénisti
CEA – DAM Île-de-France

E. d’Humières
Centre lasers intenses
et applications (Celia), UMR 5107
CNRS – CEA – Université
de Bordeaux, Talence

ÉLARGISSEMENT ET RÉPARTITION DU SPECTRE LASER POUR CONTRÔLER L’INTERACTION LASER-PLASMA

Assurer le contrôle de l’interaction entre un laser et un plasma est un enjeu crucial pour la réussite des expériences réalisées dans les grandes installations laser de puissance comme le Laser Mégajoule. La meilleure méthode pour y parvenir consiste à rendre le laser le plus incohérent possible, en élargissant son spectre parfois au détriment des performances optiques accessibles sur l’installation **1**. Une nouvelle technique a été proposée qui, en répartissant le spectre sur plusieurs faisceaux, permet de conserver un spectre large sur cible tout en augmentant les performances optiques. Cette technique ouvre la voie à un meilleur contrôle de l’interaction laser-plasma **2**.

Une des voies envisagées pour amorcer une combustion thermonucléaire en laboratoire est de transférer l’énergie de nombreux faisceaux d’un laser très énergétique, de l’ordre du mégajoule et d’une durée d’impulsion de plusieurs nanosecondes, à de la matière fusible de façon symétrique. On parle de fusion par confinement inertiel (FCI). Cela pourrait être réalisé sur l’installation Laser Mégajoule (LMJ) située au CEA – Cesta. Dans ces conditions, la matière est complètement ionisée et forme quasi immédiatement **3** un plasma. Cependant, la propagation d’un faisceau laser dans un tel milieu fait naître et croître des ondes plasma de manière instable. La diffusion

du faisceau laser sur ces ondes induit des pertes d’énergie et empêche l’obtention de la symétrie d’irradiation recherchée. Le contrôle de l’interaction du laser avec le plasma est donc un enjeu majeur pour l’obtention d’un gain thermonucléaire sur le LMJ par FCI et pour la physique des armes de la dissuasion.

La prise en compte de tous les mécanismes non linéaires, résultant de couplages entre le laser et les différentes ondes plasma, est particulièrement complexe, même si de nouvelles méthodes innovantes ont récemment été développées (voir encadré). Dans cette étude, la diffusion dite Brillouin stimulée est considérée. Ce mécanisme est néfaste parce qu’il renvoie une partie de

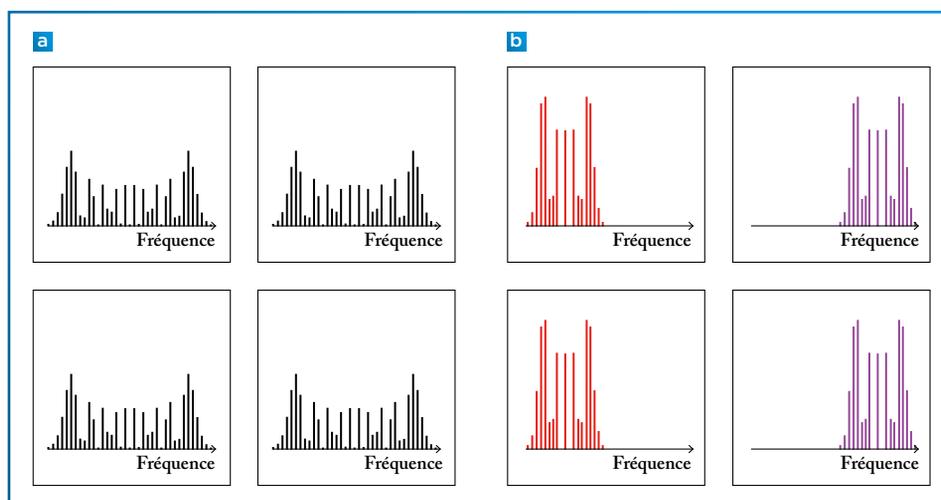


Figure 1

➔ (a) Dans le schéma actuel du Laser Mégajoule, la largeur spectrale totale est imposée sur chacun des quatre faisceaux. (b) Pour mieux contrôler l’interaction laser-plasma sur cible tout en augmentant les performances optiques du Laser Mégajoule, le schéma proposé consiste à répartir le spectre par moitié sur les faisceaux de droite et sur ceux de gauche.

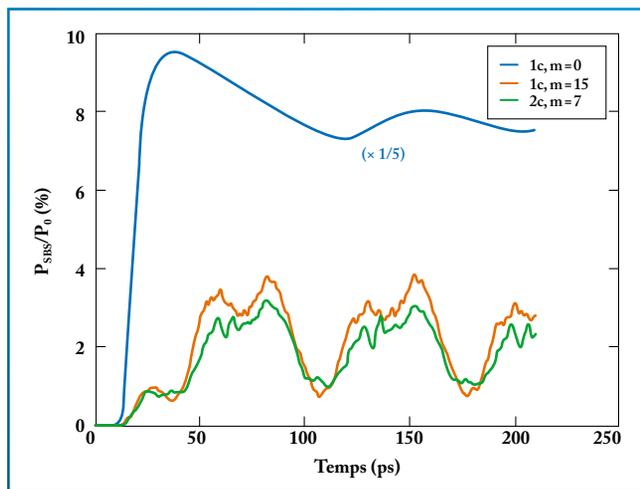


Figure 2

➔ Puissance de rétrodiffusion Brillouin (P_{SBS}) normalisée à la puissance laser incidente (P_0), calculée avec une couleur et sans lissage (1 c, $m=0$), avec lissage nominal et une couleur (1 c, $m=15$), et avec lissage par répartition du spectre sur deux couleurs (2 c, $m=7$). La fraction de puissance rétrodiffusée passe de près de 50 % à quelques pour cent seulement. Pour mieux représenter les différentes courbes, la rétrodiffusion de la lame de phase seule a été divisée par cinq.

la lumière dans l'axe des faisceaux, ce qui entraîne des pertes d'énergie sur cible et des dégâts potentiels dans la chaîne laser. Cependant, il est tout à fait possible de réduire ces instabilités. Une première étape pour les réduire est d'agrandir la tache focale des faisceaux. Mais c'est insuffisant, car il n'est pas techniquement possible de réaliser une tache focale parfaitement homogène. Pour la rendre plus homogène, on doit alors « lisser » la tache focale en la faisant bouger légèrement dans un temps très inférieur à la durée de l'impulsion afin que les instabilités à l'origine de la diffusion n'aient pas le temps de se développer. Pour ce faire, on élargit le spectre de l'impulsion par une modulation de phase, caractérisée par un paramètre m , approximativement proportionnel à la largeur spectrale. Le spectre est alors dispersé par un réseau. Les différentes longueurs d'onde viennent se focaliser en des endroits légèrement différents et cela entraîne le mouvement souhaité de la tache focale. Suivant les choix techniques, la dispersion est transverse ou longitudinale par rapport

à l'axe des faisceaux. L'efficacité du lissage reste quasiment identique, quelle que soit la direction de la dispersion **1**. Cette méthode a prouvé son efficacité dans le contrôle des instabilités et est implémentée sur le LMJ dans sa variante longitudinale.

Cependant, élargir le spectre du laser n'est pas sans conséquence sur le laser lui-même. En particulier, la modulation de phase peut générer une modulation d'amplitude non maîtrisée, susceptible de dégrader les optiques. Profitant de l'architecture laser du LMJ qui regroupe les faisceaux par quatre, une méthode innovante a été proposée **2** permettant de mieux concilier l'impératif de contrôle des instabilités et les performances optiques. Dans le schéma actuel du Laser Mégajoule, la largeur spectrale totale est imposée sur chacun des faisceaux (**figure 1a**). Comme la dégradation des optiques est liée à la largeur spectrale, répartir le spectre par moitié sur les faisceaux de droite et de gauche (**figure 1b**) permet de diminuer la largeur spectrale par faisceau. Sur cible, les deux spectres se mélangent

pour reconstituer le spectre complet. La longueur d'onde centrale, appelée couleur en référence à la lumière visible, des faisceaux de droite et de gauche est alors différente. L'efficacité de cette méthode a été testée à l'aide de simulations tridimensionnelles réalisées avec le code Hera développé au CEA-DAM **5**, démontrant que le paramètre important pour limiter la diffusion Brillouin est bien la largeur spectrale totale sur cible (**figure 2**).

Ce nouveau concept de répartition ouvre la voie à de nouveaux compromis technologiques pour les installations laser de puissance.

RÉFÉRENCES

- 1** M. DULUC *et al.*, « Comparison of longitudinal and transverse smoothing by spectral dispersion on stimulated Brillouin backscattering in inertial confinement fusion plasmas », *Phys. Plasmas*, **26**, 042707 (2019).
- 2** M. DULUC *et al.*, « Optical smoothing with reduced FM-to-AM conversion in high-power lasers using spectral distribution », *Phys. Rev. Appl.*, **12**, 054055 (2019).
- 3** G. DUCHATEAU *et al.*, « Modélisation de la transition du solide au plasma pour la FCI en attaque directe », *ce numéro*, p. 12-13.
- 4** A. DEBAYLE *et al.*, « A unified modeling of wave mixing processes with the ray tracing method », *Phys. Plasmas*, **26**, 092705 (2019).
- 5** P. LOISEAU, O. MORICE, D. TEYCHENÉ, M. CASANOVA, S. HÜLLER, D. PESME, « Laser-beam smoothing induced by stimulated Brillouin scattering in an inhomogeneous plasma », *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 205001 (2006).

➔ DE L'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE POUR DÉCRIRE LA DIFFUSION MULTIDIRECTIONNELLE DES LASERS

Toute expérience ayant lieu dans une grande installation laser comme le Laser Mégajoule, au CEA-Cesta, est modélisée et interprétée au moyen de codes hydrodynamiques radiatifs. Ces codes, dont celui du CEA-DAM, utilisent des algorithmes de tracé de rayon (optique géométrique) pour éviter d'avoir à résoudre la longueur d'onde et la période laser, trop petites pour les résolutions accessibles aux simulations. Toutefois, à ces petites échelles, différents types de couplage d'ondes se développent, modifiant la direction de propagation d'une partie de l'énergie laser. Un modèle par tirage au sort dit de Monte-Carlo, basé sur la création-perte

des rayons et intégrable à un code hydrodynamique radiatif, a été développé pour modéliser tout type de couplage d'ondes **4**. Entre autres, l'algorithme tient compte de l'échange d'énergie laser par croisement de faisceaux et des diffusions arrière et latérale des lasers dues aux instabilités dites de Raman et de Brillouin. Par exemple, un faisceau laser qui diffuse vers l'arrière sur le mode Brillouin a une probabilité de perdre un rayon, ce dernier étant recréé dans le faisceau Brillouin associé à ce laser. Ce modèle est donc beaucoup plus réaliste et approche mieux les observations expérimentales.

DESCRIPTION DU NOYAU DE L'ATOME ET DES RÉACTIONS NUCLÉAIRES DANS UN MÊME CADRE THÉORIQUE

Décrire la structure du noyau de l'atome et prédire son comportement lorsqu'il est soumis à une contrainte extérieure supposent de disposer de modèles théoriques adaptés. Le noyau peut comporter un grand nombre de nucléons, jusqu'à quelques centaines de protons et de neutrons. Décrire leurs interactions en son sein requiert de résoudre un problème dit «à N corps» pour lequel aucune solution exacte n'existe aujourd'hui. Pour pallier cette difficulté, de nombreux modèles plus ou moins élaborés ont été développés. Certains, phénoménologiques, peuvent être ajustés au cas par cas. D'autres, microscopiques, s'appuient sur de solides bases physiques; ces derniers ont en principe un bien meilleur pouvoir prédictif. L'un d'eux, développé au CEA-DAM depuis une quinzaine d'années, appelé QRPA pour *Quasi-particle random phase approximation*, a vu son pouvoir prédictif salué récemment à travers deux publications. L'une **1** concerne la mesure difficile des premiers états excités d'un noyau instable, le ^{78}Ni ; la seconde **2** est un rapport d'experts mandatés par l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique) à propos des fonctions de force γ , ingrédient essentiel pour la modélisation des réactions nucléaires impliquant des photons γ .

Les études de physique nucléaire menées au CEA-DAM Île-de-France ambitionnent une approche limitant le plus possible le recours aux corrections phénoménologiques et favorisant une description microscopique, c'est-à-dire la plus fidèle possible à la répartition des constituants. Depuis une vingtaine d'années, une approche universelle est donc développée pour être applicable à tous les noyaux, qu'ils soient déformés ou sphériques, stables ou pas, légers ou lourds. Fondée sur la théorie du champ moyen considérant les nucléons du noyau sensibles à une force globale générée par eux-mêmes, l'approche QRPA en est un

maillon fort. Elle permet, dans un même cadre théorique, de décrire tous les états d'excitation vibrationnels du noyau **3,4**, et constitue à ce jour la meilleure option pour décrire aussi bien des excitations discrètes observées à basse énergie que les résonances géantes, excitations de haute énergie situées dans le domaine dit du continuum où les états excités nucléaires ne peuvent plus être décrits ou observés individuellement.

EXCITATION DISCRÈTE DE BASSE ÉNERGIE

L'isotope de nickel ^{78}Ni est un noyau instable, car il possède un grand excès de neutrons. Il est également potentiellement

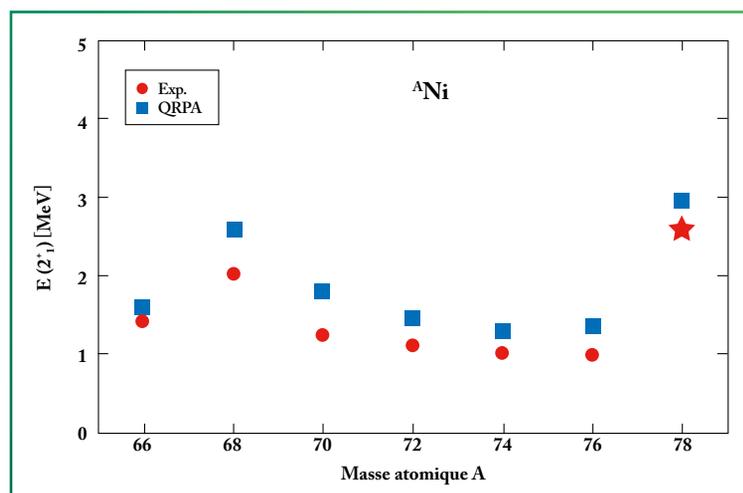


Figure 1

Énergie d'excitation E en MeV (mégaélectronvolts) du premier état excité de spin 2 et de parité positive (état 2^+), pour les isotopes lourds du nickel, en fonction de leur masse atomique A . Les valeurs déduites de l'expérience sont en rouge, la mesure récente obtenue pour le ^{78}Ni est mise en évidence par une étoile. Les prédictions QRPA sont en bleu. On constate un excellent accord entre l'approche théorique et les mesures: la variation de l'énergie d'excitation en fonction de A est bien reproduite et la valeur des énergies est prédite de façon satisfaisante, à moins de 0,5 MeV près. Les valeurs obtenues pour $A = 68$ et 78 sont liées aux effets de couches $N = 40$ et 50 qui perdurent pour ces noyaux instables.

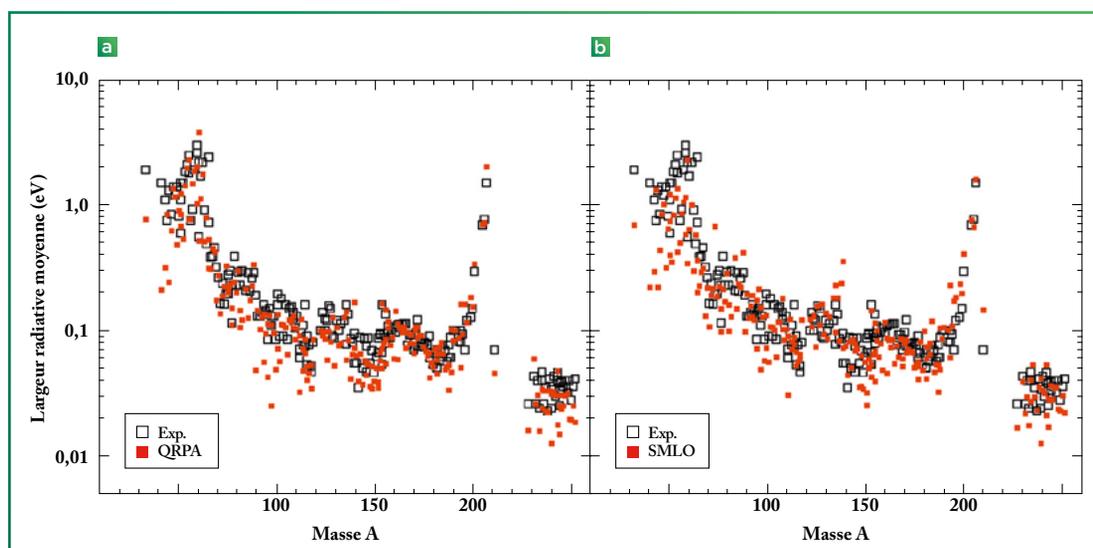


Figure 2

➔ Comparaison théorie-expérience en fonction de la masse A des noyaux pour une quantité, appelée largeur radiative moyenne, mesurant l'intégralité des photons émis lors de la désexcitation d'un noyau composé formé par l'absorption d'un neutron thermique par une cible. On observe que l'approche microscopique QRPA (a) reproduit aussi bien les données expérimentales que l'approche phénoménologique SMLO ajustée au cas par cas (b).

doublement magique : son nombre de neutrons ($N=50$) et son nombre de protons ($Z=28$) correspondent à deux couches nucléaires assurant *a priori* une grande stabilité par rapport aux noyaux voisins. Dans la chaîne isotopique des nickels, on s'attend donc pour ce noyau à une augmentation de l'énergie d'excitation des premiers états excités. Nos calculs avaient prédit une énergie d'excitation pour le premier état de ^{78}Ni proche de 3 MeV (mégaélectronvolts), bien supérieure à celles des noyaux voisins **3**, mais sa détection restait très difficile à mettre en œuvre. Récemment, une collaboration internationale a réussi cette mesure délicate au RIKEN, au Japon. La **figure 1** illustre la variation de l'énergie des premiers états excités dans la chaîne isotopique $Z=28$. Les résultats expérimentaux y sont comparés aux résultats QRPA. Cette nouvelle mesure confirme les prédictions de l'approche QRPA qui permet maintenant d'interpréter la nature de cette excitation collective de basse énergie **1**.

EXCITATION DU CONTINUUM

Les fonctions de force γ sont essentielles pour modéliser les réactions impliquant des photons γ en tant que projectiles ou particules émises. La plupart des études, théoriques ou expérimentales, supposent qu'elles dépendent uniquement de l'énergie du photon et du type de radiation : les caractéristiques quantiques des niveaux d'excitation nucléaires entre lesquels le photon intervient sont ignorées. Cette hypothèse est utilisée depuis soixante ans pour déduire

les probabilités d'émission γ , nécessaires à la modélisation de la capture radiative de neutrons, à partir de l'observation expérimentale des résonances géantes. Pour faire le point sur l'état de l'art des connaissances relatives à ces fonctions de force γ , un groupe d'experts mandaté par l'AIEA s'est réuni régulièrement entre 2016 et 2019 pour analyser les différentes données expérimentales disponibles, tenter de comprendre leurs éventuelles incohérences et parvenir à des recommandations sur les modèles théoriques supposés les reproduire. Le fruit de ce travail a permis de valider les prédictions quasi microscopiques issues de calculs QRPA systématiques réalisés sur les supercalculateurs Tera 1000 du CEA – DAM et Cobalt du Très Grand Centre de calcul au CEA. Il a aussi été mis en évidence la nécessité de poursuivre ces travaux pour en améliorer encore le pouvoir prédictif. La **figure 2** met en regard la comparaison théorie-expérience obtenue, d'une part, avec l'approche phénoménologique ajustée au cas par cas et, d'autre part, avec l'approche fondée sur la QRPA. Cette comparaison montre que l'approche QRPA reproduit aussi bien, voire mieux, les données expérimentales que l'approche phénoménologique. Cela augmente la confiance dans le pouvoir prédictif des modèles microscopiques en développement.

CONCLUSION

Le fait que l'approche QRPA puisse, dans un même cadre, décrire la structure de basse énergie des noyaux, y compris exotiques, et fournir les ingrédients nécessaires

à la modélisation des réactions nucléaires est une preuve de sa fiabilité. Cela positionne le CEA – DAM Île-de-France comme acteur de premier plan dans les collaborations internationales, aussi bien dans la communauté centrée sur la structure du noyau de l'atome que dans celle des réactions nucléaires.

RÉFÉRENCES

- 1** R. TANIUCHI *et al.*, « ^{78}Ni revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation », *Nature*, **569**, p. 53 (2019).
- 2** S. GORIELY *et al.*, « Reference database for photon strength functions », *Eur. Phys. J. A*, **55**, p. 172 (2019).
- 3** S. PÉRU, M. MARTINI, « Mean field based calculations with the Gogny force: Some theoretical tools to explore the nuclear structure », *Eur. Phys. J. A*, **50**, p. 88 (2014).
- 4** M. MARTINI, S. PÉRU, S. HILAIRE, S. GORIELY, F. LECHAFTOIS, « Large-scale deformed quasiparticle random-phase approximation calculations of the γ -ray strength function using the Gogny force », *Phys. Rev. C*, **94**, 014304 (2016).

MESURE DE SECTION EFFICACE DE CAPTURE RADIATIVE : DÉFI RELEVÉ POUR LE ^{173}Lu

Afin de tester les modèles de réactions nucléaires, les données expérimentales restent à ce jour indispensables. Parmi ces données, les sections efficaces de capture radiative sont particulièrement difficiles à prédire, car elles varient fortement d'un isotope à un autre.

La mesure – inédite – de la réaction nucléaire $^{173}\text{Lu} (n,\gamma)$, entreprise par le CEA – DAM Île-de-France en collaboration avec le Los Alamos National Laboratory, aux États-Unis, vient compléter les bases de données en apportant une section efficace de capture radiative pour un noyau instable **1**. Cette mesure s'inscrit dans le cadre des accords Basic Science entre le CEA – DAM et le DOE – NNSA américain sur la recherche fondamentale.

La capture radiative de neutron est une réaction nucléaire au cours de laquelle le noyau cible capture un neutron pour former un noyau composé (cible + neutron) qui se désexcite ensuite par émission de photons γ . Ce processus, noté (n,γ) , joue un rôle prépondérant dans la compréhension des phénomènes rencontrés dans les applications nucléaires, civiles ou militaires. Sa modélisation est donc indispensable pour un grand nombre de noyaux et sur une large plage en énergie des neutrons. Or, la description théorique de sa section efficace, c'est-à-dire de la probabilité d'interaction du noyau avec un neutron en fonction de l'énergie de ce dernier, est particulièrement délicate à estimer, car elle varie beaucoup d'un isotope à un

autre, rendant indispensable sa mesure expérimentale.

La mesure de la section efficace de capture radiative du lutécium 173 (^{173}Lu) s'inscrit dans cette problématique **1**. Le choix de ce noyau n'est pas anodin, car, en plus de son intérêt pour le programme Simulation de la DAM, le ^{173}Lu , noyau très instable, représente un cas test dans la perspective de futures mesures sur des noyaux exotiques fortement radioactifs.

L'expérience s'est déroulée sur le multidétecteur DANCE (**figure 1**), un détecteur 4π gamma conçu pour l'étude des noyaux fortement radioactifs, situé auprès de l'accélérateur LANSCE (Los Alamos Neutron Science Center), aux États-Unis, qui fournit un faisceau intense de neutrons sur une large gamme en énergie.



Figure 1

➤ Photographie du multidétecteur 4π gamma DANCE. Ce détecteur, basé au Los Alamos National Laboratory, aux États-Unis, est dédié, grâce à sa grande segmentation (162 cristaux BaF₂), à des mesures de réactions nucléaires sur des cibles fortement radioactives.

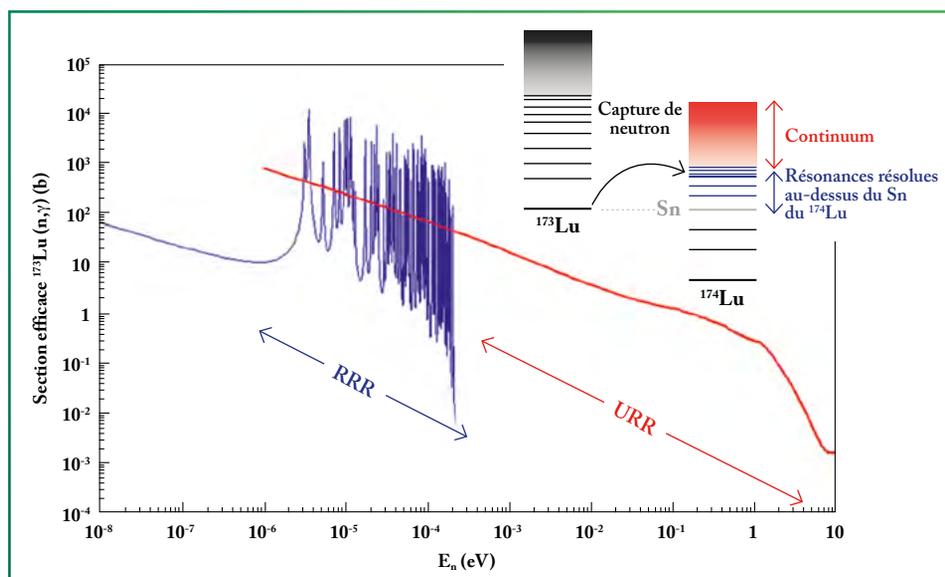


Figure 2

➔ Résultats de la mesure inédite de la section efficace de la réaction $^{173}\text{Lu}(n,\gamma)$. La courbe bleue représente l'ajustement des paramètres du code américain Sammy sur les données mesurées dans la région des résonances résolues (RRR). La courbe rouge est l'évaluation de la section efficace à plus haute énergie (URR) par le code européen Talys, directement contraint par les données; dans la région des résonances résolues, l'évaluation fournit une moyenne de la section efficace.

Le noyau de ^{173}Lu , avec un temps de demi-vie de 1,37 an, n'existe pas à l'état naturel. Le premier défi de cette campagne a donc été de fabriquer la cible. Cette dernière, unique au monde, a été conçue à partir d'un échantillon de hafnium naturel irradié pendant 14 jours par un faisceau de protons de 92 MeV, au Los Alamos Isotope Production Facility, pour créer des atomes de tantale qui décroissent par capture électronique vers différents isotopes de lutécium et d'ytterbium. Plusieurs séparations chimiques ont ensuite été nécessaires pour obtenir une cible pure de lutécium **2**.

Faire face à la forte radioactivité du ^{173}Lu représentait le second défi. En effet, la cible, de 200 μg , masse minimale pour enregistrer suffisamment de données, émettait à elle seule plus de 3×10^9 radiations par seconde. Avec un tel taux de radiations, le nombre de coups par seconde vu par chaque détecteur était de quarante millions. Ce taux de radiations, beaucoup trop élevé pour les détecteurs, a été réduit de deux ordres de grandeur grâce à un écran en plomb. Cependant, comme l'ajout de ce dispositif spécifique a fortement déformé la réponse des détecteurs, l'analyse, ainsi complexifiée, n'a été possible qu'avec l'apport de simulations très précises **3**.

La section efficace ainsi obtenue a été interprétée à l'aide de différents formalismes en fonction de l'énergie du neutron incident. Ces différentes modélisations marquent les différents états d'un noyau en fonction de son énergie d'excitation (**figure 2**). De manière générale, la section efficace suit une loi inversement propor-

tionnelle à la vitesse du neutron incident, car la probabilité d'interaction est proportionnelle au temps pendant lequel le neutron se trouve au voisinage du noyau cible. Mais, au fur et à mesure que l'énergie de ce dernier augmente, la section efficace présente de brusques variations appelées résonances qui signent les différents niveaux nucléaires non liés du noyau composé ($n + ^{173}\text{Lu} \rightarrow ^{174}\text{Lu}$). On parle alors de la région des résonances résolues (RRR). Cette région est représentée par la courbe bleue de la **figure 2**. Cette courbe a été obtenue en ajustant les paramètres du code américain Sammy **4** sur nos données expérimentales, de manière à établir la section efficace dans ce domaine. La fréquence de ces résonances augmente ensuite avec l'énergie du neutron, jusqu'à atteindre le domaine des résonances non résolues

(URR) pour lequel la largeur de ces dernières devient plus importante que l'écartement entre deux d'entre elles. Il devient alors impossible de les différencier et on se trouve désormais dans ce qui est appelé le continuum. Cette région, représentée par la courbe rouge de la **figure 2**, a été évaluée avec le code européen Talys **5** à partir des données mesurées; cette dernière représente une moyenne de la courbe bleue dans la zone de recouvrement.

Cette étude a donc non seulement fourni des données précieuses sur un noyau très instable aux codes de réactions, mais elle a également ouvert la voie à de futures expériences sur des noyaux de plus en plus exotiques en validant pour la première fois la mesure de la section efficace de capture d'un noyau très radioactif avec le détecteur DANCE.

RÉFÉRENCES

- 1** A. ÉBRAN, O. ROIG, V. MÉOT *et al.*, « Cross section for the neutron radiative capture on ^{173}Lu nuclei », *Phys. Rev. C*, **99**, 064603 (2019).
- 2** W. A. TAYLOR *et al.*, « Production of a ^{173}Lu target for neutron capture cross section measurements », *J. Rad. Nucl. Chem.*, **282**, p. 391 (2009).
- 3** M. JANDEL *et al.*, « Geant4 simulations of the DANCE array », *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **261**, p. 1117 (2007).
- 4** N. M. LARSON *et al.*, « Resonance parameter analysis with Sammy », *Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*, Mito, Ibaraki, Japon, 30 mai au 3 juin 1988, S. Igarashi (éd.), p. 573-576 (1988).
- 5** A. J. KONING *et al.*, « Modern nuclear data evaluation with the Talys code system », *Nuclear Data Sheets*, **113**, p. 2841 (2012).

CHOCs PRODUITS PAR UN FAISCEAU D'ÉLECTRONS DE TRÈS FORTE FLUENCE SUR UNE CIBLE EN ALUMINIUM

L'étude de la réponse dynamique d'un matériau irradié par un faisceau d'électrons nécessite une connaissance précise des caractéristiques physiques de ce dernier. L'analyse du faisceau produit par le générateur Cesar du CEA – Cesta permet de mieux connaître ses caractéristiques et de mieux déterminer les conditions initiales requises pour effectuer des simulations hydrodynamiques précises. Les chocs produits dans des disques minces d'aluminium sont mesurés et comparés aux prédictions des simulations **1**.

La garantie des performances des systèmes d'armes développés au CEA – DAM passe par une démarche de simulation adossée au triptyque expérimentation, modélisation des phénomènes, simulation numérique. La tenue aux irradiations par rayons X de certains de leurs matériaux constitutifs est ainsi validée par des études de chocs produits par des faisceaux d'électrons brefs et intenses **2**, tant sur le plan expérimental que sur le plan numérique. L'objectif des travaux menés est à terme de disposer d'un outil prédictif du comportement des matériaux face aux différentes menaces en s'appuyant sur les mesures précises confrontées à des calculs de dépôt d'énergie et de comportement hydrodynamique.

Au CEA – Cesta, c'est le générateur Cesar qui est utilisé pour l'étude de ces matériaux sous haute pression et haute température nécessitant un dépôt d'énergie rapide à volume constant. Cependant, le niveau d'irradiation accessible ne permet pas de couvrir toute la gamme des menaces et notamment les niveaux très élevés d'irradiation pour lesquels une extrapolation des résultats est encore nécessaire et est réalisée par simulation numérique. Dans ce cadre et afin de limiter la perte de précision sur les calculs réalisés, il est nécessaire, d'une part, d'accroître la maîtrise du terme source du générateur Cesar et, d'autre part, de chercher à en augmenter le niveau de fluence. Ces considérations, partagées avec le Sandia National Laboratory (SNL) aux États-Unis, ont conduit à la mise en place en 2017

d'une collaboration dans le cadre de l'accord *Basic Science* entre le CEA – DAM et le DOE – NNSA américain. Des données expérimentales, obtenues d'abord avec le générateur RKA **3**, sont utilisées pour valider les simulations numériques à la fois du CEA – DAM et du SNL. Cela permet de mieux appréhender la physique intervenant lors de la propagation de faisceaux d'électrons intenses dans des gaz et d'optimiser les expériences sur Cesar. Les résultats rapportés ici présentent les importantes avancées actuelles de cette démarche **1**.

Un faisceau d'électrons relativistes intense, comme celui délivré par Cesar, est généralement produit dans une diode où une impulsion de haute tension (de l'ordre de 1 MV) est appliquée entre une cathode et une anode. Une photographie de l'expérience est donnée sur la **figure 1**, associée à un schéma de la diode sous vide et de la chambre de propagation du faisceau.

Par effet de champ – un million de volts (1 MV) sur quelques millimètres –, suivi d'une émission explosive, la cathode peut délivrer trois cent mille ampères (300 kA). Cependant, à cause des effets de charge d'espace, ce courant est trop fort pour pouvoir être propagé sous vide dans la chambre d'expérience placée en aval de la diode. Une méthode pour y parvenir consiste à annuler à la fois la charge (production d'ions positifs) et le courant du faisceau (par le courant secondaire d'électrons du plasma) en remplissant la chambre d'un gaz initialement neutre (1 mbar ici). Pendant le début de l'impulsion, des ions positifs sont produits par impact des élec-

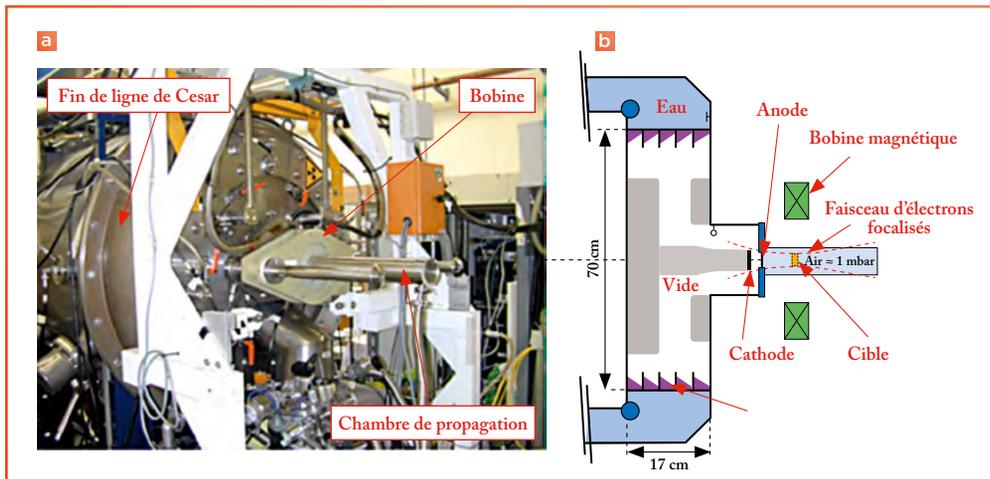


Figure 1
 ➔ (a) Photographie de la fin de ligne du générateur Cesar montrant la bobine magnétique et la chambre de propagation du faisceau. (b) Schéma de la diode à électrons qui indique l'espace entre l'anode et la cathode où le faisceau est produit, la chambre de transport remplie de 1 mbar d'air et la bobine produisant le champ magnétique d'extraction-focalisation.

trons sur les molécules neutres du gaz, ce qui annule rapidement (en près de 1 ns) la charge du faisceau. Ensuite, à une échelle de temps correspondant à l'avalanche électronique (claquage du gaz en 5 ns environ), le courant de retour du plasma ainsi formé devient suffisamment fort pour s'opposer au courant du faisceau en annulant ainsi le courant total. Ces deux effets permettent alors une propagation sur des distances significatives permettant d'utiliser le faisceau d'électrons, par exemple pour produire des chocs brefs et intenses sur une cible. Il est nécessaire et très efficace d'utiliser un champ magnétique axial extérieur, *via* une bobine placée au voisinage de la diode. Premièrement, il empêche dans cette dernière le pincement du faisceau qui apparaît sous l'effet du champ magnétique azimuthal du faisceau. Deuxièmement, il focalise les électrons sur la cible à étudier, placée en aval de l'anode, augmentant ainsi la densité d'énergie (fluence) utile sur cible. Cependant, en pratique, la neutralisation n'est pas parfaite et la physico-chimie de l'interaction du faisceau avec un gaz est très complexe, notamment pour l'air.

Grâce aux capacités accrues des outils de simulation et à de nouvelles technologies de diagnostics, la propagation sous gaz de faisceaux d'électrons intenses est de nouveau examinée. De nouveaux diagnostics ont été installés sur Cesar pour mieux caractériser le faisceau et, ainsi, améliorer la précision des conditions initiales utilisées pour initialiser les simulations et permettre une comparaison pertinente entre calculs et mesures. En plus des sondes électriques habituelles de hautes puissances impulsionnelles, un système d'imagerie optique permet maintenant d'évaluer l'homogénéité spatiale du faisceau en fonction du temps et un système de vélocimétrie hétérodyne [4] est utilisé pour mesurer la vitesse de la face arrière de la cible mise en mouvement par le choc dû au faisceau.

Deux codes développés à la DAM sont successivement utilisés pour simuler les chocs. Le code Monte-Carlo Diane calcule tout d'abord le dépôt d'énergie dans le matériau. Ensuite, le code Hésione effectue les simulations hydrodynamiques. La comparaison entre la simulation numérique et un résultat expérimental est présentée sur la figure 2. La mesure de la vitesse du point central de la face arrière de la cible (et sa principale incertitude) est indiquée en noir. Elle atteint 2500 m/s, valeur jamais obtenue sur Cesar jusqu'ici, signant une fluence très élevée (environ 3 kJ/cm²). Expérimentalement, le retard de l'arrivée du choc ne peut être interprété par les codes qu'en supposant une perte d'énergie cinétique du faisceau d'électrons lors de son transport vers la cible. Les résultats des nouveaux modules en cours de développement, capables d'étudier finement l'interaction entre un faisceau d'électrons

et un gaz, devraient permettre de mettre à l'épreuve cette hypothèse.

In fine, les récentes expériences sur Cesar [1] ont permis d'atteindre, dans des conditions maîtrisées, des fluences beaucoup plus fortes que par le passé, élargissant ainsi le domaine d'étude des matériaux.

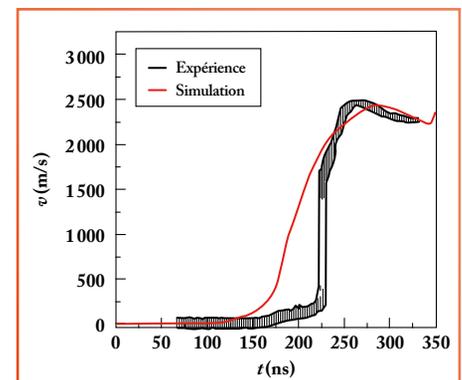


Figure 2
 ➔ Effet de l'interaction d'un faisceau d'électrons intense avec une cible d'aluminium. Le choc produit est caractérisé par la mesure de la vitesse du centre de la face arrière de la cible (en noir). Elle est comparée à celle simulée par la chaîne de calcul Diane-Hésione du CEA - DAM (en rouge).

RÉFÉRENCES

- 1 J. GARDELLE *et al.*, « High power electron beam interaction with an aluminum target: Measurements and simulations », *Journal of Applied Physics*, **126**, 153301 (2019).
- 2 F. LASSALLE *et al.*, « Hautes puissances pulsées pour l'étude des environnements sévères », *revue chocs*, **47**, p. 57-63 (2016).
- 3 K. PEPITONE *et al.*, « Optimizing the emission, propagation, and focusing of an intense electron beam », *Journal of Applied Physics*, **117**, 183301 (2015).
- 4 G. BESNARD *et al.*, « La mesure en détonique : Évolution des moyens optoélectroniques », *revue chocs*, **38**, p. 4-17 (2010).

C. Pépin, A. Sollier, A. Marizy,
F. Occeili, P. Loubeyre
CEA – DAM Île-de-France

OBSERVATION DE CHANGEMENTS STRUCTURAUX DU BISMUTH SOUS SOLLICITATION DYNAMIQUE

La compression dynamique de matériaux par laser a été couplée à une mesure de diffraction X résolue à la nanoseconde grâce à la brillance du rayonnement synchrotron de l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) à Grenoble. Le couplage de ces deux techniques permet maintenant de suivre les changements structuraux des matériaux sous chocs. Une première expérience sur le bismuth montre tout le potentiel de cette nouvelle approche expérimentale.

Des différences significatives, et parfois très surprenantes, sont observées **1** entre le diagramme de phase obtenu sous compression statique - compression très lente, en plusieurs heures, avec une cellule à enclumes de diamant - et celui observé en compression dynamique - compression très rapide, en quelques dizaines de nanosecondes, avec un laser.

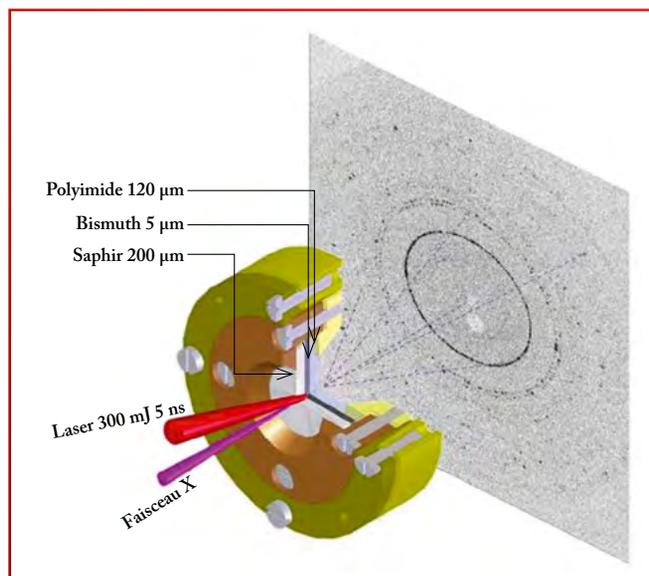
La compression dynamique par laser permet aujourd'hui de soumettre les matériaux, sur des temps pouvant varier d'une fraction à quelques dizaines de nanosecondes, à des conditions uniques de pression, température et déformation que le CEA – DAM souhaite étudier. L'étude des matériaux ainsi sollicités se fait généralement à l'aide de diagnostics de mesure de vitesse ou de température de front de compression. Les grandeurs thermodynamiques macroscopiques, pression, densité et température, sont alors mesurées et les transitions de phase sont détectées par des discontinuités d'évolution des vitesses de front de choc. Mais les informations microscopiques sur la réponse structurale des matériaux ne sont ainsi pas accessibles. De nombreuses ques-

tions ouvertes attendent donc des mesures capables de suivre à l'échelle atomique la réponse du matériau comprimé : quelle est l'influence de la cinétique et des contraintes sur les transitions de phase ? Les transitions structurales sous compression dynamique sont-elles identiques à celles observées en compression statique ? Quelle est l'influence de la vitesse de déformation sur le diagramme de phase d'un matériau ?

Pour sonder à l'échelle atomique les quelques micromètres de matière comprimée par laser, il faut une impulsion X très brillante et délivrée en un temps court par rapport au temps de compression. Depuis quelques années, la mesure de l'arrangement atomique des matériaux soumis à une sollicitation dynamique est rendue possible par la mise en place de bancs de compres-

Figure 1

➤ Schéma de principe de l'expérience : un laser de 300 mJ et de durée d'impulsion 5 ns est focalisé sur une cible de 15 mm de diamètre à l'interface saphir-bismuth, générant un choc qui se propage dans l'échantillon. Le faisceau X vient ensuite sonder le bismuth sous choc à différents temps, permettant ainsi d'observer *in situ* l'évolution structurale de l'échantillon. L'information est récupérée sur un détecteur 2D placé derrière la cible.



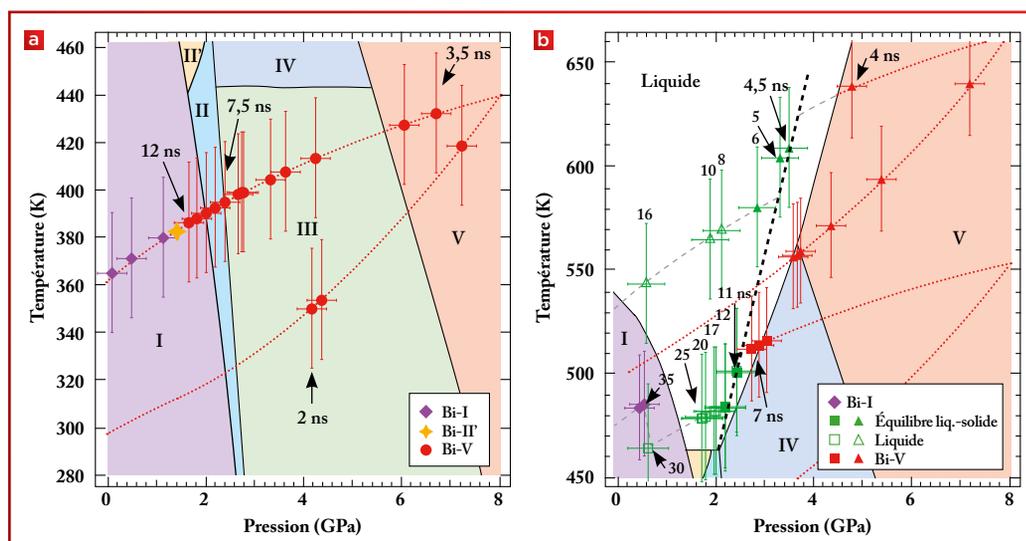


Figure 2

2 Diagramme de phase du bismuth (a) à basse et (b) à haute température et jusqu'à 8 GPa. Les domaines de stabilité statique des différentes phases du bismuth (notées I, II, II', III, IV et V) apparaissent en fond de différentes couleurs. Les chemins de compression et de détente parcourus lors de l'expérience de compression dynamique sont représentés par les lignes rouges et les lignes en pointillé gris. Chaque point expérimental se trouvant sur ces chemins est identifié par la phase obtenue par diffraction X et est associé au temps auquel la matière a été sondée. On note ainsi l'apparition de la phase Bi-V (points rouges) dans le domaine de stabilité de la phase Bi-III (domaine vert) sur la figure (a), ou encore un décalage de la ligne de fusion (transition solide-liquide) sur la figure (b). Le diagramme de phase mesuré lors de la compression dynamique est ainsi drastiquement différent de celui mesuré sous pression statique.

sion laser à proximité de sources X appelées lasers à électrons libres, ou en générant une source X très brillante à l'aide d'un faisceau laser pétawatt sur les grosses installations laser. Des résultats très encourageants ont déjà été obtenus. Cependant, la stabilité en énergie et en position de ces sources X n'est pas optimale pour effectuer des mesures structurales aussi fines que celles effectuées avec des synchrotrons sous de très hautes pressions statiques. Une nouvelle étape dans la qualité des mesures structurales en compression dynamique vient d'être franchie par l'étude du bismuth sous chocs confinés auprès du synchrotron ESRF à Grenoble.

Le bismuth est un système modèle pour étudier la physique des transitions de phase sous pression. Sous quelques gigapascals (1 GPa = 10 000 atm), celui-ci possède six phases solides différentes notées I, II, II', III, IV et V. Chaque phase correspond à un arrangement structural différent, certaines phases présentant des structures complexes, dites « *host guest* », avec deux types d'atomes. Le bismuth présente de plus la particularité de posséder un minimum sur sa courbe de fusion, situé aux alentours de 2 GPa et 450 K, ce qui permet facilement l'étude de la fusion et de la cristallisation sous chocs. Son diagramme de phase statique est donc bien connu.

L'étude par diffraction X du bismuth sous compression dynamique a été réalisée sur la ligne de lumière ID09 de l'ESRF. Un schéma de principe de l'expérience est présenté sur la figure 1. Un laser infrarouge de longueur d'onde 1064 nm et de durée 5 ns est focalisé sur une cible constituée

par une face avant en saphir, une feuille de 5 micromètres de bismuth et une face arrière en polyimide. Une technique dite de choc confiné **2** est mise en œuvre pour atteindre, avec une grande reproductibilité, des pressions allant jusqu'à 10 GPa. Le faisceau X vient ensuite sonder la partie choquée de l'échantillon. En faisant varier le délai entre l'arrivée du laser sur la cible et la sonde X, il est possible de suivre temporellement l'évolution structurale du matériau pendant le choc et, après son passage, lors de la détente.

Les résultats issus de ces expériences sont résumés sur la figure 2. Les spectres de diffraction X ont été obtenus à l'aide d'un unique paquet X de 100 ps. La qualité des données permet de distinguer aisément et sans ambiguïté les différentes phases. Les figures 2a et b montrent l'ensemble des points collectés en fonction de la pression et de la température, à différents temps par rapport à l'arrivée du laser sur la cible et donc au départ du choc. La pression est obtenue à partir des données de diffraction X, tandis que la température est estimée à partir de modèles hydrodynamiques. Les différentes couleurs représentent les différentes phases observées et les points sont superposés sur le diagramme de phase du bismuth mesuré sous pression statique. Deux observations majeures peuvent alors être faites. Premièrement, alors que les chemins de compression et de détente passent par les domaines de stabilité statique des phases II et III, ces deux phases aux structures très complexes ne sont jamais observées. Au contraire, la structure cubique simple Bi-V est observée largement en

dehors de son domaine de stabilité statique. On note également l'apparition de la phase II' lors du passage de la phase V vers la phase I. Cette phase II' n'avait précédemment été observée qu'à haute température. En partant de cibles préchauffées à 400 et 500 K, il a également été possible d'aller sonder la courbe de fusion du bismuth en détente, comme illustré sur la figure 2b. Une surchauffe d'environ 60 K et une surfusion d'environ 80 K ont pu être mesurées.

Cette étude, menée avec succès par le CEA-DAM Île-de-France, montre qu'un diagramme de phase mesuré lors d'une compression dynamique peut être radicalement différent de celui mesuré sous pression statique **1**. Le développement auprès de l'ESRF d'une plateforme de compression dynamique pouvant produire à terme des chocs à l'aide d'un laser de 200 J et utilisant la très grande brillance de la nouvelle machine qui sera opérationnelle fin 2020 devrait permettre de mieux comprendre pourquoi et comment certaines structures cristallines à de très hautes pressions et températures peuvent être stabilisées par la vitesse de compression.

RÉFÉRENCES

- 1** C. M. PÉPIN *et al.*, « Kinetics and structural changes in dynamically compressed bismuth », *Phys. Rev. B*, **100**, 060101(R) (2019).
- 2** R. FABBRO *et al.*, « Physical study of laser-produced plasma in confined geometry », *J. Appl. Phys.*, **68**, p. 775-784 (1990).

DÉVELOPPEMENT DE CAPTEURS QUANTIQUES POUR DES MESURES DE MAGNÉTISME À HAUTE PRESSION

En associant une technique de génération de très haute pression – la cellule à enclumes de diamant – et une technique d'optique quantique – les centres dits NV du diamant –, de nouvelles mesures sur les matériaux magnétiques deviennent possibles. Les travaux du CEA – DAM Île-de-France **1** ont démontré la possibilité d'utiliser ces capteurs quantiques à haute pression. Deux mesures confirment l'intérêt de ce nouveau diagnostic: la mesure d'une transition magnétique sous pression du fer et la mesure de la température de supraconductivité d'un échantillon de MgB_2 sous pression.

L'étude des matériaux en conditions extrêmes de pression révèle des phénomènes physiques originaux, que le CEA – DAM caractérise dans le cadre du programme Simulation. La compression d'un solide modifie ses propriétés chimiques et structurales, et peut constituer une voie de synthèse de nouveaux matériaux aux propriétés remarquables: matériaux ultradurs, énergétiques ou supraconducteurs.

Parmi ces solides remarquables, les superhydrures occupent une place centrale **2**. Deux résultats récents **3,4** ont confirmé qu'ils pouvaient être des supraconducteurs à des températures proches de la température ambiante. D'autres prédictions attendent d'être vérifiées, mais les expériences restent difficiles à mettre en œuvre.

La cellule à enclumes de diamant (CED) permet de comprimer les matériaux à des pressions allant jusqu'à plusieurs millions d'atmosphères (plusieurs centaines de gigapascals) et d'étudier leurs propriétés dans ces conditions. Mesurer les propriétés d'un matériau de taille micrométrique confiné entre les diamants de la CED représente cependant un défi. Pour dépasser les limitations liées à la pression maximale atteinte et aux difficultés de caractérisation, les techniques de mesure en CED n'ont pas cessé d'évoluer depuis son invention il y a soixante ans **5**. La richesse des phénomènes physiques découverts récemment sous pression encourage le développement de méthodes de caractérisation toujours plus précises.

Ces dernières années, les synchrotrons ont permis des progrès importants dans les mesures sous pression pour déterminer la structure cristallographique d'un matériau. Mais d'autres propriétés sont plus difficiles à mesurer sur les échantillons sous pression. C'est le cas du magnétisme, pourtant d'un grand intérêt, notamment pour mettre en évidence les propriétés supraconductrices des hydrures ou caractériser des transitions de phases magnétiques.

L'objectif était ici d'utiliser une technologie de type « capteur quantique » pour réaliser sous pression des caractérisations magnétiques de très grande sensibilité, avec une résolution spatiale de l'ordre du micromètre. La technique développée présente de plus l'avantage d'être une mesure optique de laboratoire dont la mise en œuvre est aisément reproductible et transférable.

Les capteurs utilisés pour cette mesure magnétique sont les « centres NV » du diamant (*Nitrogen-Vacancy*, ou centres colorés azote-lacune). Il s'agit de défauts du diamant à l'échelle atomique: un atome d'azote se substitue à un atome de carbone et l'atome de carbone adjacent est manquant. La présence du défaut modifie localement la structure électronique du diamant. Le centre NV présente ainsi une transition entre deux niveaux d'énergie électronique, à une fréquence proche de 2,87 GHz dans le domaine micro-onde. L'utilisation du centre NV comme capteur consiste à mesurer la modification de cette fréquence sous l'effet d'une perturbation externe. Cette mesure est réalisée grâce à l'observation des variations de la luminescence émise par le centre

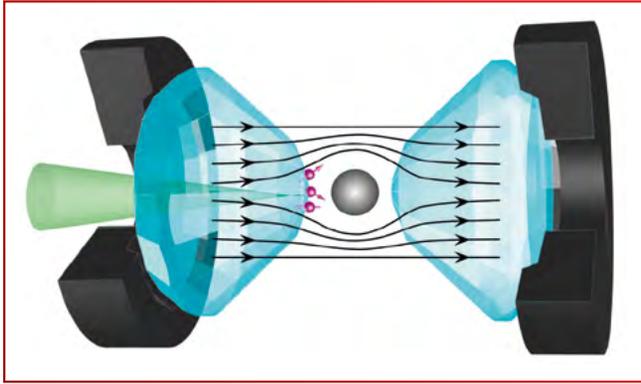


Figure 1

➔ Cellule à enclumes de diamant (CED) et schéma de principe de l'observation de l'effet Meissner. La géométrie des enclumes de diamant, et en particulier le rapport des surfaces des enclumes, permet d'appliquer des pressions extrêmes sur l'échantillon, représenté par la bille grise. Les centres NV, représentés par les flèches roses, sont implantés à la surface d'une enclume. L'excitation (en vert) des centres NV et la collecte de la fluorescence se font à travers l'enclume transparente pour lire l'état d'excitation des centres NV. En combinant celles-ci avec une excitation micro-onde (non représentée), le champ magnétique à l'intérieur de la CED peut être mesuré. Un échantillon supraconducteur expulse le champ magnétique extérieur (lignes de champ en noir) : cela conduit à une diminution du champ magnétique proche de l'échantillon, observable par les centres NV.

NV, lorsqu'il est excité par un laser vert et soumis à une excitation micro-onde dont on fait varier la fréquence. Le résultat permet une mesure quantitative de la perturbation : dans notre cas, un champ magnétique créé par le matériau étudié.

Une nappe de centres NV a été implantée à la surface d'une enclume de diamant à l'aide d'un faisceau d'ions azote focalisé (ou FIB, pour *Focused Ion Beam*). L'échantillon est ensuite positionné directement au contact de la surface de l'enclume pour maximiser la sensibilité de la mesure. Au cours de l'expérience, sous pression et en présence d'un champ magnétique, la luminescence des centres NV est collectée à travers l'enclume de diamant transparente.

Le champ magnétique est ainsi mesuré en chaque point de la nappe de centres NV. La sensibilité de cette technique a été démontrée en observant le comportement magnétique de deux échantillons de nature différente.

Dans un premier temps, les propriétés magnétiques du fer sous pression ont été revisitées. Le fer est ferromagnétique à pression ambiante, mais perd son ferromagnétisme vers 15 GPa. La technique développée dans cette étude a permis de mesurer l'aimantation d'une bille de fer de quelques micromètres, et son évolution sous pression, mettant en évidence une disparition progressive de l'aimantation en fonction de la pression.

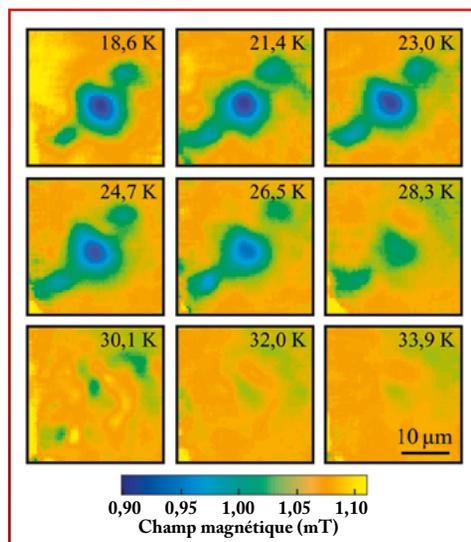


Figure 2

➔ Mesure du champ magnétique à proximité d'un échantillon de MgB_2 , pour différentes valeurs de température et sous une pression de 7 GPa. L'image représente la valeur du champ magnétique mesurée en chaque point de la surface de l'enclume autour de l'échantillon, avec une résolution micrométrique. Un champ magnétique extérieur d'environ 1 mT est appliqué. On observe une diminution locale du champ magnétique au niveau de l'échantillon, qui est supraconducteur en dessous de 30 K pour cette valeur de pression. Cette diminution disparaît progressivement lorsque l'on approche, puis que l'on dépasse la température critique de supraconductivité de MgB_2 . La température critique de supraconductivité peut ainsi être mesurée avec une bonne précision.

La technique a ensuite été appliquée à la mise en évidence d'une transition supraconductrice, à haute pression et basse température. Un supraconducteur expulse un champ magnétique appliqué : c'est l'effet Meissner. Cette expulsion du champ appliqué est mesurée grâce aux centres NV (figure 1). L'expérience a été réalisée sur un échantillon de diborure de magnésium, MgB_2 , comprimé à 7 GPa. À basse température, 20 K, et en présence d'un champ magnétique externe, on mesure loin de l'échantillon le champ magnétique appliqué. Proche de l'échantillon, on constate que le champ magnétique est plus faible, révélant l'état supraconducteur (figure 2). En réchauffant l'échantillon au-dessus de la valeur attendue de la transition supraconductrice, l'effet de répulsion du champ s'annule comme prévu 1.

Des développements se poursuivent pour tirer pleinement profit des possibilités offertes par les centres NV : mesures à des pressions plus élevées ou couplage à des mesures sur synchrotron. Les centres NV offrent également des perspectives de caractérisation des matériaux hors cellules à enclumes de diamant qui seront explorées au CEA – DAM.

RÉFÉRENCES

- 1 M. LESIK, T. PLISSON, L. TORAILLE *et al.*, « Magnetic measurements on micrometer-sized samples under high pressure using designed NV centers », *Science*, **366**, 6471, p. 1359-1362 (2019).
- 2 P. LOUBEYRE, G. GENESTE, B. GUIGUE, A. MARIZY, C. PÉPIN, « Des superhydrures sous pression », revue *chocs focus*, **6**, p. 14-15 (2019).
- 3 A. P. DROZDOV *et al.*, « Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system », *Nature*, **525**, p. 73-76 (2015).
- 4 M. SOMAYAZULU *et al.*, « Evidence for superconductivity above 260 K in lanthanum superhydride at megabar pressures », *Phys. Rev. Lett.*, **122**, 027001 (2019).
- 5 P. LOUBEYRE, A. DEWAELE, G. WECK, F. OCCCELLI, O. MARIE, « De nouvelles formes d'enclume de diamant pour étudier la matière très comprimée », revue *chocs avancées*, **13**, p. 18-19 (2019).

ÉTUDE DE LA STRUCTURATION DU LIANT DANS UNE COMPOSITION ÉNERGÉTIQUE

Les explosifs développés au CEA-DAM sont des matériaux composites agrégataires dans lesquels un constituant organique nitré majoritaire, le renfort, est finement associé à un liant polymère. Une bonne répartition du liant est essentielle pour garantir la cohésion de l'ensemble et obtenir les propriétés mécaniques requises.

Dans les travaux réalisés au CEA-Le Ripault, la qualité de mélange du polymère et sa structuration ont d'abord été évaluées à partir d'observations obtenues grâce au microscope électronique à balayage (MEB) et à la spectroscopie EDS (*Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*).

Une distribution hétérogène avec des amas de polymères de plusieurs micromètres a pu être directement visualisée. Pour compléter ces mesures dont la résolution spatiale est limitée par le caractère isolant des composés, une autre approche a été élaborée : elle repose sur le phénomène de diffusion de spin en résonance magnétique nucléaire (RMN) du solide. Les résultats obtenus récemment montrent l'existence d'une interphase constituée de liant rigidifié à proximité du renfort. Sa taille caractéristique ainsi que celle de l'épaisseur moyenne de liant ont été déterminées **1**.

Les matériaux énergétiques sont constitués de grains de matière, le renfort, dont la cohésion est assurée par une faible proportion de polymère qui joue le rôle de liant. De bonnes propriétés mécaniques s'obtiennent en réalisant un mélange le plus intime possible entre grains de renfort et liant. La répartition spatiale du liant est une donnée essentielle pour améliorer nos connaissances des relations entre structure et propriétés, et pour affiner les modèles numériques de prédiction du comportement.

Le MEB permet en principe d'obtenir une visualisation directe du liant. Les images sont par nature acquises en noir et blanc. L'attribution des différentes nuances de gris observées s'appuie sur la spectroscopie EDS. Cette technique, disponible dans le même appareil, fournit des cartographies de résolution de l'ordre du micromètre, construites point par point à partir d'une raie spectrale caractéristique d'un atome donné (figure 1). Ainsi, les zones plus claires sur la carte du carbone sont attribuées à la présence de liant, qui comporte dans sa structure plus de carbone que le renfort. Ces images MEB/EDS révèlent une répartition hétérogène du liant sous forme d'amas pouvant atteindre plusieurs dizaines de micromètres.

Cependant, la résolution réellement accessible par ces approches est limitée du fait de conditions expérimentales particulières imposées par la nature isolante des composés. Il existe une autre approche pour mesurer la structuration du polymère qui utilise la diffusion de spin en RMN

du solide. Celle-ci repose sur un transfert spatial d'aimantation grâce aux interactions magnétiques entre les spins des noyaux d'hydrogène. Cette expérience donne une information moyennée sur tout l'échantillon, mais avec une résolution de deux à trois ordres de grandeur supérieure à celle obtenue précédemment. Elle est généralement utilisée pour caractériser des tailles de domaines de quelques nanomètres existant au sein même des polymères **2**. Elle a été adaptée au CEA-Le Ripault pour l'étude de matériaux composites **1**. Dans ce cas, un filtrage magnétique permet d'abord d'observer sélectivement le signal du polymère, espèce minoritaire, en supprimant toute contribution provenant du renfort. Par principe, les domaines à caractériser dans le polymère doivent comporter des chaînes moléculaires dont la structure

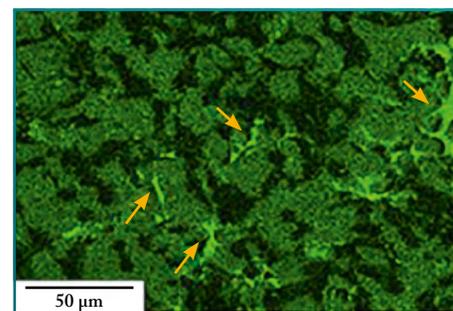


Figure 1

➔ Cartographie obtenue par spectroscopie EDS (*Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*), acquise avec le microscope électronique à balayage, construite à partir de la raie du carbone d'un composite agrégataire inerte mimant la structure d'un explosif. Les amas de liant indiqués par les flèches jaunes ressortent en vert clair sur l'image EDS, qui illustre l'hétérogénéité de la répartition du liant.

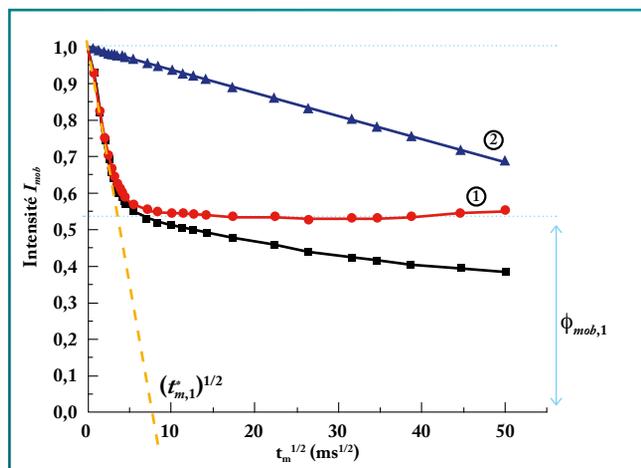


Figure 2

→ Courbe de diffusion du matériau composite construite à partir de l'intensité du signal normalisé provenant de l'aimantation de la partie mobile du polymère. La décroissance est décomposée en deux processus de diffusion distincts : (1) une cinétique rapide et (2) une cinétique lente. $t_{m,1}$ un temps caractéristique et $\phi_{mob,1}$ la proportion d'atomes d'hydrogène contenus dans les domaines mobiles sont des grandeurs utilisées pour calculer la taille des domaines impliqués dans le processus (1). Les mêmes grandeurs sont déterminées pour le processus (2).

présente une mobilité localement différente de celle de la matière environnante. Cette propriété sert à produire un déséquilibre magnétique en annulant sélectivement l'aimantation de la composante la plus rigide ; pendant le temps de mélange t_m qui suit, le système tend à s'équilibrer par transfert d'aimantation. Ainsi, le signal de la partie mobile enregistré pour différentes valeurs de t_m décroît, l'aimantation étant transférée vers la partie la plus rigide. Une valeur d'équilibre est atteinte lorsque l'aimantation est uniformément répartie entre les deux domaines (figure 2). La cinétique de la courbe de diffusion reflète les proportions de chacun des domaines et leur géométrie. En pratique, cela donne graphiquement accès aux deux grandeurs : un temps caractéristique qui correspond à l'intersection de la tangente initiale avec l'axe des abscisses, et la valeur finale atteinte pour les temps de diffusion les plus longs qui représente la proportion de domaines mobiles. Connaissant le coefficient de diffusion, une taille de domaine est ensuite calculée pour un modèle géométrique donné.

Dans une composition énergétique, la courbe obtenue présente le plus souvent deux décroissances. Sous l'hypothèse de processus indépendants de diffusion, les deux composantes décroissantes ont été séparées mathématiquement puis renormalisées. La plus rapide, notée 1, est associée à la présence de petits domaines déjà présents au sein même du polymère seul. En supposant leur géométrie isotrope (3D), le calcul donne un diamètre moyen de l'ordre de 9 nm. La composante plus lente, notée 2,

observée uniquement dans les composites, a été attribuée à l'existence d'une interphase de liant rigidifiée au contact du renfort. En géométrie lamellaire (1D), son épaisseur moyenne est évaluée à 38 nm (figure 3). Dans le cadre de ce modèle, la connaissance de la proportion d'atomes d'hydrogène dans les domaines mobiles ϕ_{mob} permet finalement d'extrapoler la valeur de l'épaisseur totale de liant séparant deux grains de renfort à 240 nm (figure 3).

La microstructure du liant dans les explosifs peut être sondée de façon complémentaire par les observations MEB/EDS et RMN du solide. Le MEB donne une vision directe et permet de localiser les principaux amas de liant. La RMN est sensible aux plus petits domaines, de quelques dizaines de nanomètres, et met en évidence l'existence d'une interphase rigidifiée au contact du renfort. Son épaisseur moyenne et celle de liant séparant deux grains de renfort ont pu être déterminées. Les valeurs obtenues montrent que le polymère est structuré en couches plus fines et donc réparti de manière plus homogène qu'il n'y paraît de prime abord. Des calculs de dynamique moléculaire

ont été entrepris en collaboration avec le CEA-DAM Île-de-France pour conforter ces résultats et le modèle proposé à partir des données RMN.

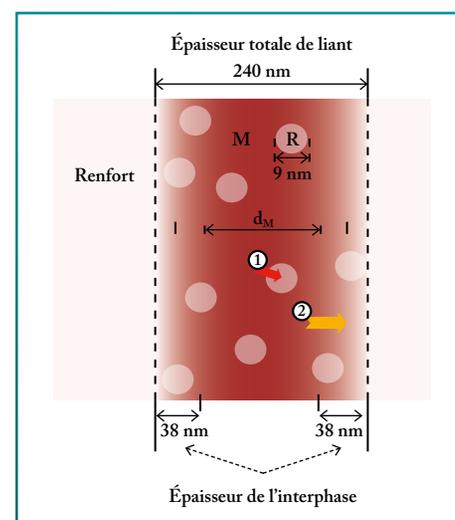


Figure 3

→ Modèle de structuration du liant dans un composite proposé pour interpréter les deux processus de diffusion observés par résonance magnétique nucléaire : (1) une diffusion rapide du liant mobile M vers de petits domaines isotropes rigides R ; (2) une diffusion plus lente du polymère « libre » d'épaisseur d_M vers l'interphase I rigidifiée à proximité du renfort.

RÉFÉRENCES

- 1 S. PARISSÉ, J.-F. PETIT, A. FORZY, A. LECARDEUR, S. BEAUGRAND, P. PALMAS, « Binder and interphase microstructure in a composite material characterized by SEM and NMR spin diffusion experiments », *Macromol. Chem. Phys.*, **221**, 1900310, doi.org/10.1002/macp.201900310 (2020).
- 2 K. LANDFESTER, H. W. SPIESS, « Characterization of interphases in core-shell latexes by solid-state NMR », *Acta Polym.*, **49**, p. 451-464 (1998).

ZONES DE MÉLANGE TURBULENTES GÉNÉRÉES PAR ACCÉLÉRATIONS OSCILLANTES

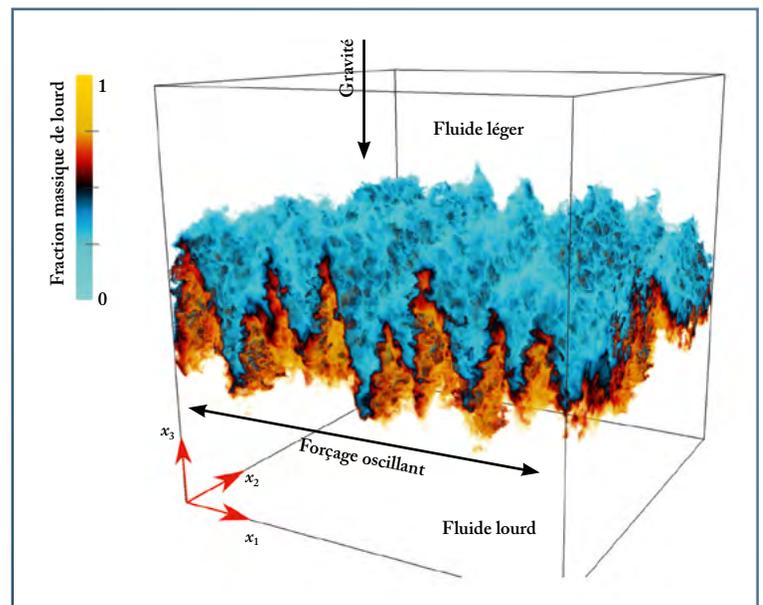
L'interface entre deux fluides miscibles de densités différentes peut se déformer pour produire un mélange turbulent lorsqu'elle est soumise à une accélération oscillante. Ce mécanisme est dit paramétrique, car il intervient quand les modes propres du système stratifié entrent en résonance avec la fréquence caractéristique de l'accélération. Une étude théorique et numérique du problème permet de révéler différents scénarios de transition à la turbulence et d'en déduire l'état final du mélange 1-3. Pour la première fois, une campagne expérimentale a pu valider ces prédictions 4.

Les mélanges turbulents jouent un rôle important dans de nombreuses applications, notamment pour la fusion par confinement inertiel (FCI), où l'état du mélange entre le matériau appelé ablateur et le combustible de deutérium-tritium conditionne grandement le taux de réaction de fusion. Lors de l'implosion d'une cible, les interfaces entre matériaux sont soumises à des accélérations fortement variables en temps et peuvent ainsi développer des instabilités hydrodynamiques. Dans ce processus, les irrégularités des interfaces sont exponentiellement amplifiées jusqu'à former des enroulements tourbillonnaires et à générer de la tur-

bulence. Or, en 1831, Michael Faraday avait déjà remarqué qu'une interface même soumise à de toutes petites vibrations pouvait se déformer. Cette instabilité, qui porte le nom du célèbre physicien, constitue un paradigme pour mieux comprendre les mélanges aux interfaces soumises à des accélérations variables en temps, comme celles rencontrées en FCI. Dans ce contexte, les travaux menés au CEA-DAM Île-de-France ont montré qu'il est possible de prédire les états finaux des mélanges turbulents résultants au moyen de simulations numériques néanmoins très coûteuses.

La réponse d'une interface soumise à une accélération oscillante dépend des

Figure 1
Champ de concentration dans une simulation numérique d'une interface initiale soumise à une accélération horizontale périodique en temps, effectuée sur le supercalculateur pétaflopique Cobalt du Très Grand Centre de calcul, au CEA – DAM Île-de-France, et représentant 200 000 heures CPU 3. Les structures en onde gelée apparaissent dans la zone de mélange turbulente et sont caractéristiques de l'instabilité paramétrique.



résonances possibles entre la fréquence de forçage en accélération et les modes propres du système. Quand le système entre en résonance, une instabilité paramétrique se développe. Celle-ci peut être harmonique ou sous-harmonique si elle évolue à la fréquence ou à la demi-fréquence du forçage, comme dans le cas de l'instabilité de Faraday. Un mécanisme paramétrique intense peut stabiliser une zone de mélange dite de Rayleigh-Taylor ou même modifier la position d'équilibre d'une interface. Ainsi, dans le cas d'un forçage horizontal, l'instabilité harmonique résultante entraîne la formation de structures turbulentes en dents de scie appelées ondes gelées (figure 1) 3. L'analyse théorique proposée 1,3 explique l'interaction non linéaire des ondes d'interface qui évoluent à mesure que la zone de mélange s'élargit dans les fluides miscibles.

Plusieurs scénarios de transition à la turbulence ont été identifiés pour les instabilités paramétriques d'interface. Souvent, le mode ayant le taux d'amplification le plus fort domine pour former une onde stationnaire. L'amplitude de celle-ci croît puis sature non linéairement en formant des « champignons » qui produisent le mélange turbulent (figure 2). Mais il existe des conditions pour lesquelles plusieurs modes de longueurs d'onde différentes se développent simultanément. Un cas particulier se produit quand des modes harmoniques et sous-harmo-

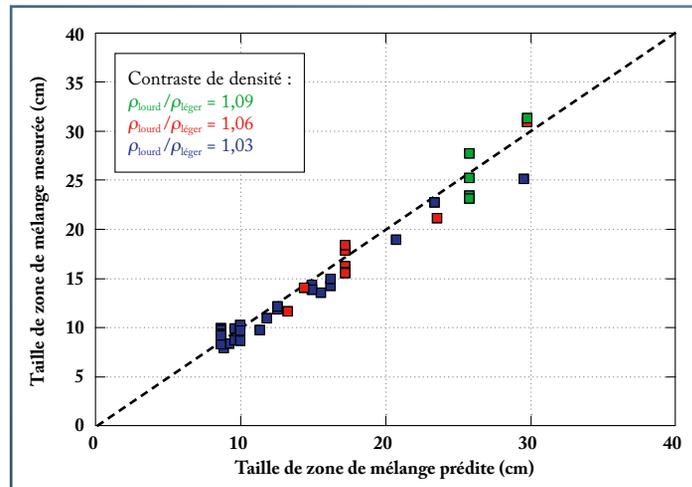


Figure 3
 ➔ Tailles finales de zone de mélange produite par l'instabilité de Faraday avec différents rapports de densité : la comparaison entre prédiction théorique et mesures expérimentales montre un excellent accord 1,4.

niques coexistent 2 et interagissent, ce qui amène à l'établissement rapide d'un régime turbulent.

En régime pleinement turbulent, les modes du système sont fortement couplés au champ moyen de densité. Les fluctuations turbulentes élargissent la zone de mélange, mais entraînent aussi une diminution progressive des fréquences propres du système, ce qui inhibe l'instabilité. Ainsi, les zones de mélange atteignent une taille finale exprimant la masse totale de fluide mélangé. Ces valeurs peuvent être calculées analytiquement, suivant le critère que les fréquences propres du système ne sont plus excitées par le forçage 1,4. Les résultats des simulations

numériques et des expériences sur grande cuve de la campagne Faramix montrent un excellent accord avec ces prédictions théoriques analytiques pour l'instabilité de Faraday. Ces dernières permettent ainsi d'évaluer la quantité de mélange entre les fluides beaucoup plus rapidement qu'avec la simulation numérique (figure 2 et 3).

Les instabilités paramétriques conduisent à une grande sensibilité des mélanges turbulents aux variations d'accélération. Malgré la complexité du processus impliquant un grand nombre d'ondes, de nouvelles approches théoriques permettent cependant d'établir des modèles prédictifs qui peuvent aussi être utilisés pour mieux les contrôler.

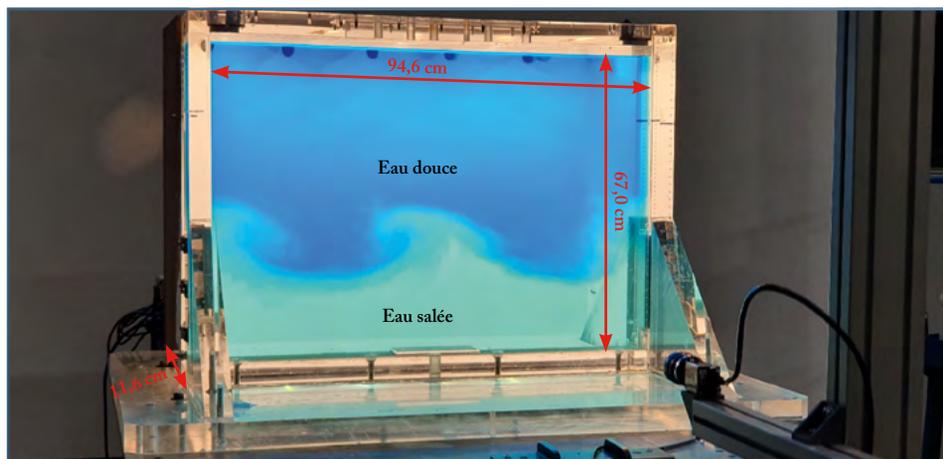


Figure 2
 ➔ Instabilité de Faraday dans une expérience de la campagne Faramix qui a été réalisée au Laboratoire d'essais de mouvements liquides de la société GTT (Gaz Transport & Technigaz). Les mouvements verticaux de forçage (accélération) sont générés par une plateforme sur hexapode. Le mélange turbulent entre l'eau douce colorée en bleu foncé et l'eau salée apparaît ici au niveau de l'instabilité en forme de champignon du mode principal.

RÉFÉRENCES

- 1 B.-J. GRÉA *et al.*, « What is the final size of turbulent mixing zones driven by the Faraday instability? », *J. Fluid Mech.*, **837**, p. 293-319 (2018).
- 2 A. BRIARD *et al.*, « Harmonic to sub-harmonic transition of the Faraday instability in miscible fluids », *Phys. Rev. Fluids*, **4**, 044502 (2019).
- 3 B.-J. GRÉA *et al.*, « Frozen waves in turbulent mixing layers », *Phys. Rev. Fluids*, **4**, 064608 (2019).
- 4 A. BRIARD *et al.*, « The turbulent Faraday instability in miscible fluids », *J. Fluid Mech.*, **883**, A57 (2020).

DIMENSIONNEMENT DYNAMIQUE PRÉDICTIF DE STRUCTURES MÉCANIQUES NON LINÉAIRES

Les têtes nucléaires sont soumises à des environnements vibratoires sévères pendant les phases d'emport sous missile ou de rentrée atmosphérique.

La prise en compte de la dissipation d'énergie dans la réponse vibratoire des structures constitue un enjeu important, car elle conditionne l'amplitude de la réponse en déplacement et en contrainte, et donc les marges de dimensionnement.

Les principales sources de dissipation sont généralement localisées au niveau des liaisons. Elles s'accompagnent le plus souvent d'effets non linéaires marqués 1-4. Il est possible de les identifier expérimentalement à partir d'essais simples dans les phases précoces des projets 1. L'introduction de ces modèles de liaison lors de l'élaboration du modèle numérique de la structure permet de restituer le comportement non linéaire et dissipatif de la structure globale de manière prédictive par simulation numérique 3,4.

La modélisation de la réponse dynamique d'une structure à une excitation vibratoire entretenue s'appuie, d'une part, sur la prévision des modes de résonance, et d'autre part, sur la connaissance de l'amortissement. Pour les systèmes linéaires, le premier point est aujourd'hui bien maîtrisé. Ce n'est pas le cas pour l'amortissement, qui est généralement identifié expérimentalement sur la structure globale dans les phases de qualification finales. Cette vérification tardive rend toute modification difficile si l'amortissement mesuré est inférieur aux valeurs anticipées. Pour réduire ce risque, le CEA-DAM développe, depuis 2012, une stratégie de modélisation par parties des systèmes mécaniques complexes. Elle consiste à assembler les modèles réduits des

sous-ensembles en introduisant les modèles non linéaires des liaisons identifiés à partir d'essais élémentaires. Ces derniers sont réalisés sur des expérimentations simples dans les phases précoces des programmes. La prise en compte du comportement non linéaire des liaisons est indispensable, car une approche purement linéaire pour déterminer le comportement des têtes nucléaires contraint à garder des marges de dimensionnement élevées. Cette approche, qui associe modélisation linéaire des sous-ensembles et non linéaire des liaisons, est très efficace, car les principales sources de non-linéarité sont localisées dans les zones singulières que constituent les liaisons. Les non-linéarités ont pour origine le frottement entre surfaces de contact ou le frottement interne des matériaux élastomères présents dans les

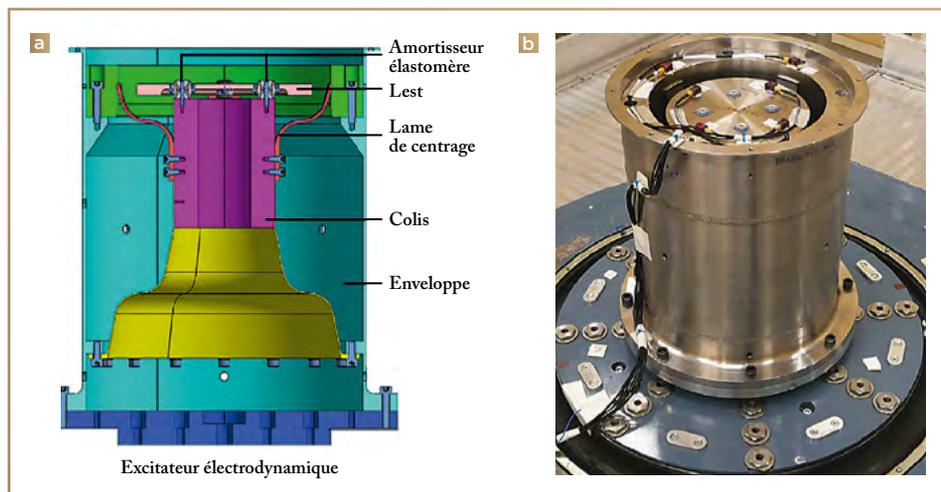


Figure 1

➔ (a) Représentation en coupe des différents sous-ensembles et (b) photographie de la maquette Harmonie. Les sources de non-linéarités sont les patins frotteurs entre l'enveloppe et le colis, les amortisseurs élastomères entre le lest supérieur et le colis.

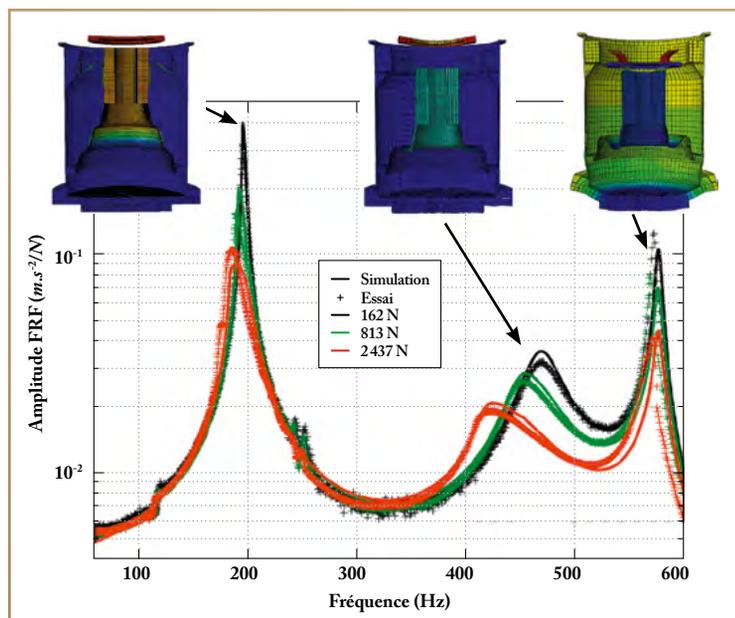


Figure 2

➔ Amplitude de la fonction de réponse en fréquence (FRF) normalisée de la maquette Harmonie au sommet du lest, pour des forces d'excitation longitudinale de niveaux croissants (162, 813 et 2 437 N). Le pic autour de 190 Hz correspond au mode longitudinal du colis. La bosse entre 400 et 500 Hz correspond aux mouvements du lest suspendu par les amortisseurs élastomères et le pic à 560 Hz correspond au mouvement d'ensemble colis plus lest. Les essais sont représentés par des croix, les calculs sont en traits pleins. La très bonne corrélation essai-calcul démontre le caractère prédictif de la démarche de simulation vibratoire non linéaire.

dispositifs amortisseurs. Des non-linéarités globales de type géométrique peuvent parfois aussi exister [2]. L'ensemble des non-linéarités, globales et locales, conduit à une forte dépendance des fréquences de résonance et de l'amortissement à l'amplitude de l'excitation. Le modèle numérique de l'objet complet permet de restituer l'ensemble des phénomènes non linéaires de la réponse comme ceux déjà cités, mais aussi l'apparition d'harmoniques et les couplages de modes [3,4].

L'approche numérique repose sur une technique de condensation qui permet de décrire le comportement dynamique global d'une structure à partir du comportement modal de ses divers sous-ensembles, tout en prenant en compte les interfaces qui les relient. Cette technique permet de choisir le nombre de modes décrivant chaque sous-ensemble et donc, *in fine*, de limiter la taille du modèle global. Le modèle réduit global non linéaire est obtenu en introduisant les lois de comportement non linéaires locales au moment de l'assemblage des différents sous-ensembles. La solution du problème non linéaire est recherchée par une méthode appelée « équilibrage harmonique » [4] (*Harmonic Balance Method*, HBM). Les sollicitations envisagées sont sinusoïdales ou aléatoires. La prise en compte des excitations aléatoires est une extension récente des travaux en dynamique non linéaire au CEA-DAM. Dans ce dernier cas, le signal aléatoire est approché par une série multiharmonique dont les phases sont aléatoires. Ce choix permet d'utiliser la méthode de résolution HBM pratiquement sans modification, au simple prix de l'augmentation

de la taille de la série multiharmonique qui décrit la réponse [1,2].

Dans le domaine des lois de comportement locales, la prise en compte du frottement simple, dit de Coulomb, déjà présenté dans [4], est complétée par des lois spécifiques pour les amortisseurs élastomères [1].

La figure 1 présente la maquette Harmonie du CEA-Cesta. Cette maquette est composée d'un corps central, appelé colis, relié à une enveloppe externe par des lames de centrage. Un lest est fixé sur le colis par des amortisseurs élastomères. Lorsqu'elle est soumise à des excitations vibratoires sinusoïdales ou aléatoires, la maquette est le siège de phénomènes non linéaires de natures très différentes : frottement des lames et forte dépendance de la raideur vis-à-vis de l'amplitude des oscillations pour les élastomères présents dans les amortisseurs [3]. Le comportement dynamique est décrit par la fonction de réponse en fréquence (FRF), qui est le rapport entre l'accélération de la réponse et la force d'excitation. La figure 2 présente la comparaison entre les essais et les calculs de la FRF mesurée au niveau du lest supérieur pour des excitations sinusoïdales de niveaux croissants. Les effets de glissement de fréquence et de dépendance de la réponse au niveau d'excitation sont très visibles sur cette expérience. La correspondance entre les essais, présentés par des croix, et les calculs, en traits pleins, est bonne, quel que soit le mécanisme non linéaire activé.

La stratégie de modélisation retenue permet de restituer les principaux phénomènes non linéaires et en particulier la dépendance de la raideur et de la dissipation au niveau d'excitation. La mise à disposi-

tion précoce des modèles de liaison, d'une part, et l'aspect prédictif de la modélisation non linéaire, d'autre part, permettent une maîtrise des marges de dimensionnement durant toutes les phases de développement des projets. La suite de ces études s'intéressera à la représentation condensée des chargements acoustiques.

RÉFÉRENCES

- 1 T. RONCEN, J.-J. SINOU, J.-P. LAMBELIN, « Experiments and nonlinear simulations of a rubber isolator subjected to harmonic and random vibrations », *J. Sound Vibrat.*, **451**, p. 71-83 (2019).
- 2 T. RONCEN, J.-P. LAMBELIN, J.-J. SINOU, « Nonlinear vibrations of a beam with non-ideal boundary conditions and stochastic excitations – Experiments, modeling and simulations », *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.*, **74**, p. 14-29 (2019).
- 3 T. RONCEN, J.-J. SINOU, J.-P. LAMBELIN, « Experiments and simulations of an industrial assembly with different types of nonlinear joints subjected to harmonic vibrations », *J. Sound Vibrat.*, **458**, p. 458-478 (2019).
- 4 M. CLAEYS, J.-P. LAMBELIN, J.-J. SINOU, R. TODESCHINI, « Experiments and numerical simulations of nonlinear vibration responses of an assembly with friction joints – Application on a test structure named 'Harmony' », *Mechanical Systems and Signal Processing*, **70-71**, p. 1097-1116 (2016).

MODÉLISATION DE LA FRAGMENTATION DES CHARGES MILITAIRES CONVENTIONNELLES

La maîtrise des effets des charges militaires conventionnelles est un enjeu majeur pour les forces armées.

Les combats modernes, où de plus en plus souvent des populations se trouvent exposées à proximité des belligérants, imposent d'accroître la maîtrise des effets collatéraux tout en optimisant les effets militaires.

Parmi les différents effets, les éclats générés constituent un sujet encore largement ouvert et pourtant capital dans la mesure où, la plupart du temps, leur dispersion définit les zones de danger. En effet, que l'on considère l'efficacité (léthalité) militaire ou la sécurité (maîtrise des effets collatéraux), les éclats sont souvent les effets dont la maîtrise est la plus délicate dans la détermination des zonages. Dans le cadre de son expertise au profit de la Défense, le CEA - Gramat reprend les modèles mécaniques historiques **1** avec pour objectif de les améliorer et de disposer à terme d'un outil prédictif.

Les charges militaires conventionnelles sont constituées de trois sous-ensembles : une enveloppe, généralement en acier, un chargement explosif contenu dans l'enveloppe et un dispositif de sécurité et d'armement. Trois types d'effets sont engendrés par l'explosion : effet thermique, effet de souffle et génération et éjection d'éclats. L'effet des éclats est singulier dans la mesure où la quantité d'éclats est un nombre entier : ils sont issus du croisement des fissures qui se propagent dans l'enveloppe. Les éclats d'une charge militaire sont éjectés à des vitesses très importantes (1 000 à 2 000 m/s) ; les zones d'effet associées sont notablement plus étendues que celles des effets de souffle ou thermiques et cela justifie l'intérêt de les maîtriser.

La prévision des zones d'effets des éclats d'une charge explosive nécessite de connaître leur distribution en masse et en nombre. Les premières études scientifiques sur la fragmentation ont vu le jour durant la Seconde Guerre mondiale au Royaume-Uni. En supposant l'existence d'un front de relaxation qui se propage autour des fissures, N. F. Mott **2** proposa en 1943 le premier modèle physique expliquant le processus de fragmentation. Son approche, nécessairement simplifiée, a été appliquée à un cylindre de longueur infinie, géométrie caractéristique d'une charge à fragmentation (obus, bombes).

Cette approche requiert quatre « ingrédients » : une loi donnant la cinématique

de l'enveloppe (non perturbée par la fragmentation), une loi d'activation des fissures, une loi de propagation du front de relaxation et enfin une loi d'interaction entre deux fronts de relaxation. Les travaux présentés ici ne s'intéressent qu'à la loi de propagation du front de relaxation. Dans l'analyse originale **2**, l'auteur suppose que les fissures s'ouvrent instantanément. À chaque ouverture, un front de relaxation est émis, ce dernier rigidifie la zone qu'elle affecte et interdit toute ouverture de fissure ultérieure (**figure 1**). La loi de propagation ainsi déterminée est de type parabolique (courbe en rouge sur la **figure 2**). La position du front de l'onde X est reliée au temps t par la relation $X^2 = Dt$, où D est un paramètre dépendant du matériau et de la vitesse de déformation **3** ; dans ce cas particulier, on parle d'onde de Mott. Dans les années quarante, le modèle original a été enrichi par D. E. Grady **3**, qui a introduit une énergie (travail) d'ouverture des fissures au travers d'une loi décrivant leur ouverture. L'effet sur la propagation est une réduction de la vitesse d'avance du front durant la phase d'ouverture de la fissure qui redevient parabolique par la suite (courbe en noir sur la **figure 2**). Cet apport majeur se trouve malheureusement fortement limité. D'une part, il n'y a pas de solution analytique pour une forme quelconque de loi d'ouverture. D'autre part, l'identification des paramètres introduits par Grady est très complexe.

Pour répondre aux besoins de la Défense, le CEA–Gramat a entrepris dans le cadre d’une démarche de simulation un travail de modélisation à partir de ces travaux historiques ainsi qu’un développement de systèmes d’expérimentation spécifiques pour en valider la modélisation. En particulier, une analyse originale a été proposée ¹ afin de s’affranchir des limitations de l’approche de Grady. Sur la base d’un bilan d’énergie, cette approche a permis d’établir une relation forte et explicite entre la loi d’ouverture de fissure et la loi de propagation du front de relaxation qu’elle étend de fait. Elle permet, en supposant une forme de loi de propagation, d’en déduire une loi d’ouverture de fissure directement intégrable dans l’algorithme proposé par Mott pour le calcul de la distribution des éclats en nombre et en masse. Cette approche est particulièrement intéressante, car elle permet de déterminer une loi d’ouverture de fissure simplement à partir des observations expérimentales ou de simulations numériques à l’aide de codes de physique, ce qui n’était pas possible avec l’approche de Grady. En outre, l’approche par bilan énergétique du CEA–Gramat permet d’explorer les solutions physiquement acceptables, c’est-à-dire des lois mathématiques cohérentes avec les équations de la mécanique (figure 2), et leurs conséquences sur les dis-

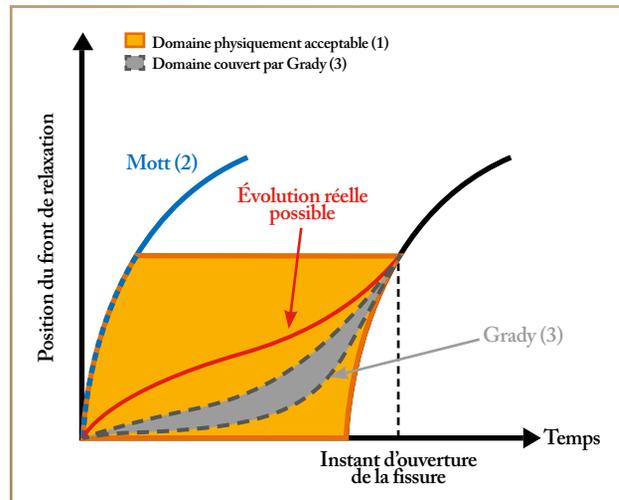


Figure 2

➤ Évolution temporelle de la position du front de l’onde de relaxation dans le plan temps-position. La solution de Mott est représentée en bleu (2). Les solutions apportées par Grady en gris (3) ne couvrent qu’une partie du domaine en orange physiquement acceptable ; la propagation, une fois la fissure totalement ouverte, correspond à la solution de Mott décalée en temps (courbe noire). L’approche (1) développée par le CEA – Gramat permet de couvrir l’ensemble de ce domaine physiquement acceptable et de restituer tous les comportements possibles.

tributions en masse et en nombre d’éclats, pour un anneau, ce qui constitue l’expérience la plus élémentaire de fragmentation.

L’amélioration des dispositifs expérimentaux et l’extension de cette approche au-delà des hypothèses originelles (comportement du matériau, déformations modérées, effets de courbure, etc.) sont en

cours afin d’améliorer la capacité à restituer les expériences. Par ailleurs, des travaux visant à étendre l’approche de Mott à la configuration d’un cylindre de longueur finie afin de disposer d’un modèle prédictif pour une configuration représentative des besoins de la Défense ont également été engagés.

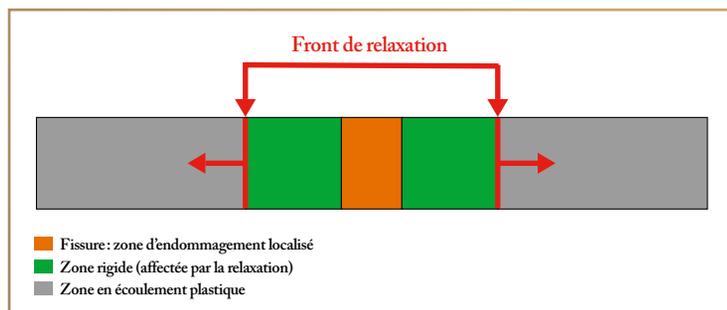


Figure 1

➤ Propagation du front de relaxation (couleur rouge) le long d’une barre en extension uniforme. La couleur grise indique la zone en écoulement plastique. La couleur verte indique les zones affectées par l’onde de Mott dans lesquelles aucune fissure ne peut s’ouvrir. La couleur orange indique la zone de fissuration (ouverture instantanée ² ou retardée ^{1,3}).

RÉFÉRENCES

- ¹ G. DAMAMME, J. VERMUNT, D.-P. ZAPPA, H. KLÖCKER, « Stress release waves in plastic solids », *J. Mech. Phys. Sol.*, **128**, p.21-31 (2019).
- ² N. F. MOTT, « Fragmentation of shell cases », *Proc. R. Soc. Lond.*, **A189**, p 300-308 (1947).
- ³ D. E. GRADY, *Fragmentation of rings and shells – The legacy of N. F. Mott*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2006).

M. Chorel, E. Lavastre, L. Lamaignère, A. Ollé, N. Blanchot,
T. Lanternier, J. Neauport, J. Luce, N. Roquin, C. Rouyer, M. Sozet
CEA – Cesta

N. Bonod, L. Gallais
Institut Fresnel, UMR 7249 CNRS – Centrale
Marseille – Aix-Marseille Université, Marseille

B. Bousquet
Centre lasers intenses et applications (Celia), UMR
5107 CNRS – CEA – Université de Bordeaux, Talence

S. Papernov, A. A. Kozlov, B. N. Hoffman, J. B. Oliver, S. G. Demos
Laboratory for Laser Energetics (LLE), University of Rochester, États-Unis

A. Melnikaitis
Laser Research Center, Vilnius University, Lituanie

TENUE DES COMPOSANTS OPTIQUES AU FLUX DE LASERS À IMPULSION COURTE

Augmenter l'énergie et la puissance de lasers tels que Petal au CEA – Cesta ou Omega-EP au Laboratory for Laser Energetics (LLE) à Rochester (NY), aux États-Unis, est un enjeu important pour atteindre des conditions d'interaction laser-matière. Pour ce faire, il faut notamment améliorer la résistance au flux laser des composants optiques, comme les miroirs de transport sous vide. Le développement de miroirs plus résistants est désormais possible grâce à la création d'un algorithme d'optimisation des empilements multicouches constituant ces miroirs et aux études sur la précision de caractérisation de la tenue au flux laser [1,2]. Cela permet au CEA – DAM, qui exploite le laser Petal, et à ses collaborateurs d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques gouvernant l'endommagement laser de composants multicouches dans le régime d'impulsion courte.

En 2018, le prix Nobel de physique a été décerné aux professeurs français Gérard Mourou et canadien Donna Strickland pour l'amplification laser dite par dérive de fréquence (CPA, pour *Chirped Pulse Amplification*), démontrée en 1985. Cette technique a permis de repousser les limites de la puissance laser accessibles et a rendu possible la création de lasers de classe pétawatt, tels que Petal au CEA – Cesta et Omega-EP au LLE. De nos jours, la montée en puissance de ces installations est limitée par la tenue au flux laser des composants optiques qui doivent transporter jusqu'à la cible d'interaction laser-matière des faisceaux à faible durée impulsionnelle, typiquement de 0,5 à 10 ps.

Ces composants, des miroirs de transport, sont constitués d'un empilement alternant des couches constituées d'un matériau diélectrique à indice de réfraction haut (couche H) et d'un second à indice de réfraction bas (couche L), déposées sur des substrats en verre. Pour des impulsions de durée de l'ordre de la picoseconde ou subpicoseconde, l'endommagement laser est un phénomène déterministe pour lequel la limite de tenue au flux laser (TFL) mesurée est donnée par la relation suivante : $TFL = TFL_{int}/EFI_{max}$: cette limite dépend ainsi à la fois de la tenue au flux laser intrinsèque des matériaux (TFL_{int}) et de la répartition de l'intensité du champ électrique de la lumière dans la structure multicouche ; EFI_{max} , pour *maximum elec-*

tric field intensity, est le rapport de l'intensité du champ électrique à celle du champ incident $EFI_{max} = |E|_{max}^2/|E_0|^2$. L'amélioration de la tenue au flux laser consiste alors à diminuer EFI_{max} en optimisant le design des empilements et à augmenter TFL_{int} en choisissant de nouveaux matériaux et/ou procédés de fabrication.

Dans un empilement de miroirs classique (figure 1a), les pics d'intensité du champ électrique sont situés aux interfaces entre les couches et EFI_{max} est obtenu dans les deux couches supérieures, les premières à recevoir le flux laser. Ainsi, l'endommagement a lieu dans la couche avec la tenue au flux intrinsèque la plus faible, le matériau à indice haut en général. Pour augmenter la tenue au flux des miroirs, le CEA – Cesta a développé un algorithme d'optimisation capable de générer des empilements multicouches avec des intensités du champ électrique réduites dans le matériau le plus sensible tout en conservant une bonne réflectivité et en prenant également en compte la robustesse aux erreurs de fabrication [3]. Pour cela, l'algorithme modifie les épaisseurs des couches supérieures pour déplacer les maxima d'intensité tout en laissant inchangées les couches inférieures qui, elles, assurent la réflectivité. Le design de la figure 1b est un exemple d'application où EFI_{max} est atténué dans les couches H, ce qui conduit à une augmentation théorique de la tenue au flux d'un facteur 1,6 par rapport au design classique

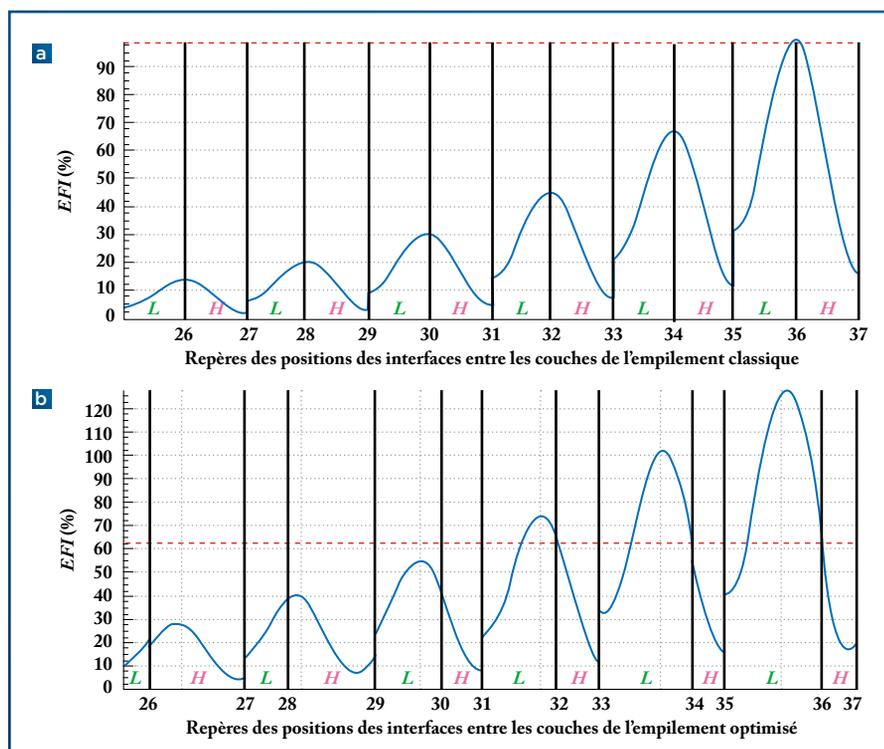


Figure 1

➔ Intensité du champ électrique normalisée au champ incident EFI dans les douze couches supérieures de miroirs multicouches (a) classique et (b) déterminé grâce à l'algorithme. Les lignes verticales noires représentent les interfaces entre les couches de matériaux à indice de réfraction haut (H) et bas (L). Les indices de réfraction et les tenues au flux intrinsèques TLF_{int} sont supposés être respectivement égaux à 1,86 et 1,14 J/cm^2 pour le matériau H (HfO_2) et à 1,44 et 2,74 J/cm^2 pour le matériau L (SiO_2). Les lignes rouges indiquent les valeurs de surintensité du champ électrique dans le matériau H où l'endommagement laser commence, respectivement 99 % pour (a) le miroir classique et 63 % pour (b) le miroir déterminé grâce à l'algorithme. Le sens de propagation du laser pour cette représentation est de droite à gauche.

de la **figure 1a**. Cet algorithme a été validé expérimentalement sur échantillon en 2019 en calculant et fabriquant un miroir avec une tenue au flux laser effective améliorée d'un facteur 1,73.

L'application de cet algorithme requiert la sélection et la caractérisation préalable des matériaux qui constituent le miroir, car les données d'entrée sont les indices et les tenues au flux intrinsèques. Les matériaux les plus couramment utilisés sont le dioxyde de hafnium HfO_2 et la silice SiO_2 , respectivement comme matériaux à indice haut et bas. Le CEA-Cesta a mené une étude comparative sur un panel de monocouches de ces deux matériaux déposés par divers procédés de fabrication et a observé une dispersion inattendue des valeurs de tenue au flux laser pour un matériau donné **1**. En effet, la dispersion des valeurs n'est pas cohérente avec des lois de la littérature. En collaboration avec le LLE, le CEA-Cesta a cherché à corrélérer la tenue au flux intrinsèque à d'autres propriétés des matériaux, comme l'absorption. Les résultats (**figure 2**) ont montré une bonne adéquation entre la tenue au flux intrinsèque dans l'infrarouge et l'absorption dans le domaine de longueur d'onde de l'absorption multiphotonique (355 nm pour HfO_2 et 266 nm pour SiO_2). Ce lien indique la prédominance de l'absorption multiphotonique dans les phénomènes à l'origine de l'endommagement laser en impulsion courte et permet d'envisager le

développement d'un moyen expérimental non destructif pour évaluer la tenue au flux laser.

La caractérisation de la tenue au flux laser en impulsion courte est très dépendante des réglages du banc de test, notamment la durée des impulsions et le profil temporel d'intensité de ces impulsions **2**.

En conclusion, l'ensemble de ces travaux va mener à la fabrication de nouveaux miroirs de transport dans l'objectif d'étendre le profil d'emploi de Petal. Cette démarche peut en outre être appliquée à l'optimisation des réseaux de compression d'impulsion, autres composants critiques sujets à endommagement laser en impulsion courte.

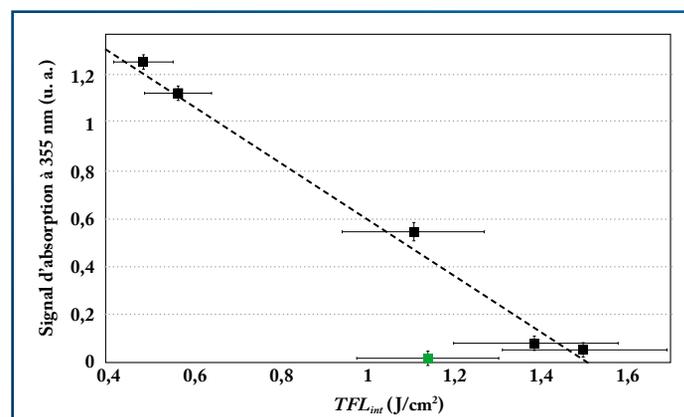


Figure 2

➔ Corrélation entre le signal d'absorption multiphotonique à 355 nm et la tenue au flux laser intrinsèque à 1053 nm d'échantillons de HfO_2 produits par divers procédés. Ce lien indique la prédominance de l'absorption multiphotonique dans les phénomènes à l'origine de l'endommagement laser. Le carré vert correspond à la variété de HfO_2 utilisée pour l'optimisation présentée sur la **figure 1**.

RÉFÉRENCES

- 1** M. CHOREL *et al.*, « Influence of absorption-edge properties on subpicosecond intrinsic laser-damage threshold at 1053 nm in hafnia and silica monolayers », *Optics Express*, **27**, p. 16922-16934 (2019).
- 2** A. OLLÉ *et al.*, « Implications of laser beam metrology on laser damage temporal scaling law for dielectric materials in the picosecond regime », *Rev. Sci. Instrum.*, **90**, 073001 (2019).
- 3** M. CHOREL *et al.*, « Robust optimization of the laser induced damage threshold of dielectric mirrors for high power lasers », *Optics Express*, **26**, p. 11764-11774 (2018).

LA CHIMIE ANALYTIQUE AU SERVICE DE LA CRIMINALISTIQUE

Un dispositif novateur d'analyse en temps réel d'explosifs à l'état de traces par spectrométrie de masse a été mis au point au CEA – DAM Île-de-France à partir d'échantillons de frottis collectés sur des surfaces après explosion. Un traitement original des données a permis d'identifier et de catégoriser rapidement (i) la nature des divers constituants de l'explosif, (ii) la source et (iii) l'origine des explosifs utilisés **1**. L'application de ce dispositif à des échantillons réels provenant de saisies effectuées dans le cadre d'enquêtes judiciaires a permis de valider cette approche. Ce travail, mené en collaboration avec les équipes du Laboratoire central de la préfecture de police de Paris (LCPP) et de l'Institut parisien de chimie moléculaire (IPCM), illustre les efforts du CEA – DAM dans le domaine de la lutte contre le risque NRBC-E, la prolifération nucléaire et les dispositifs explosifs improvisés.

La menace terroriste qui pèse sur les pays occidentaux contraint les autorités à mettre en place des stratégies rapides et efficaces de prévention contre tout risque d'attentat ou, dans certains cas extrêmes, à être très réactives après une explosion dans la caractérisation des composés utilisés. Par ailleurs, l'usage de matériaux explosifs dans la fabrication d'engins nucléaires, comme éléments de mise en configuration critique des matières fissiles, justifie également cet intérêt dans le domaine de la lutte contre la prolifération nucléaire.

Une explosion disperse une multitude de particules dont la connaissance des propriétés physico-chimiques permet aux experts d'interpréter le processus de l'explosion en identifiant les éléments de l'engin explosif qui l'a déclenché. Un des indicateurs pertinents pour identifier l'origine des explosifs est l'empreinte moléculaire

2. En effet, la plupart des formulations explosives se composent de cristaux d'explosifs dilués dans une matrice de liants polymériques, de composés plastiques, d'huiles, de cires, d'additifs organiques divers et de contaminants ou produits de dégradation **3,4**. Si plusieurs techniques analytiques permettent de caractériser ces compositions, comme la chromatographie en phase liquide ou gazeuse pour les composés organiques et la chromatographie d'échange d'ions pour les composés inorganiques, les contraintes de temps favorisent le plus souvent le recours à des méthodes analytiques rapides.

Une série d'explosions contrôlées de différents explosifs plastiques provenant de saisies effectuées dans le cadre d'enquêtes judiciaires a été réalisée sur le site pyrotechnique du laboratoire central de la préfecture de police et les particules générées ont été collectées sur des frottis (**figure 1**).

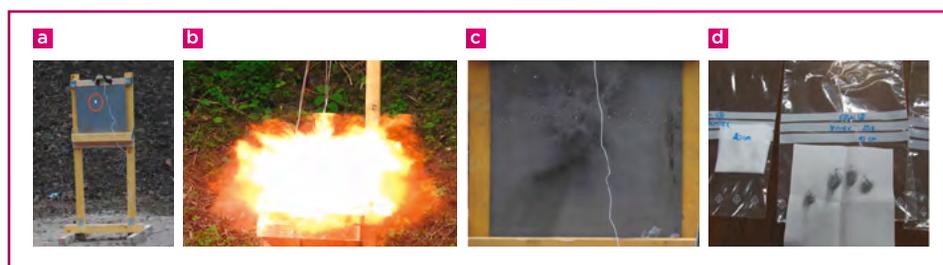


Figure 1

Photographies illustrant la détonation d'une charge de Semtex 10 sur le site pyrotechnique du laboratoire central de la préfecture de police et collecte des particules sur frottis: (a) une charge de 20 grammes de Semtex 10 (entourée en rouge sur la photo) est suspendue à 20 cm d'une plaque de collecte de particules; (b) explosion de la charge de Semtex 10; (c) une partie des particules libérées par l'explosion sont récupérées à la surface de la plaque; (d) des tissus en cellulose (appelés frottis) sont frottés sur la surface de la plaque pour récupérer les particules et conditionnés jusqu'à leur analyse au laboratoire.

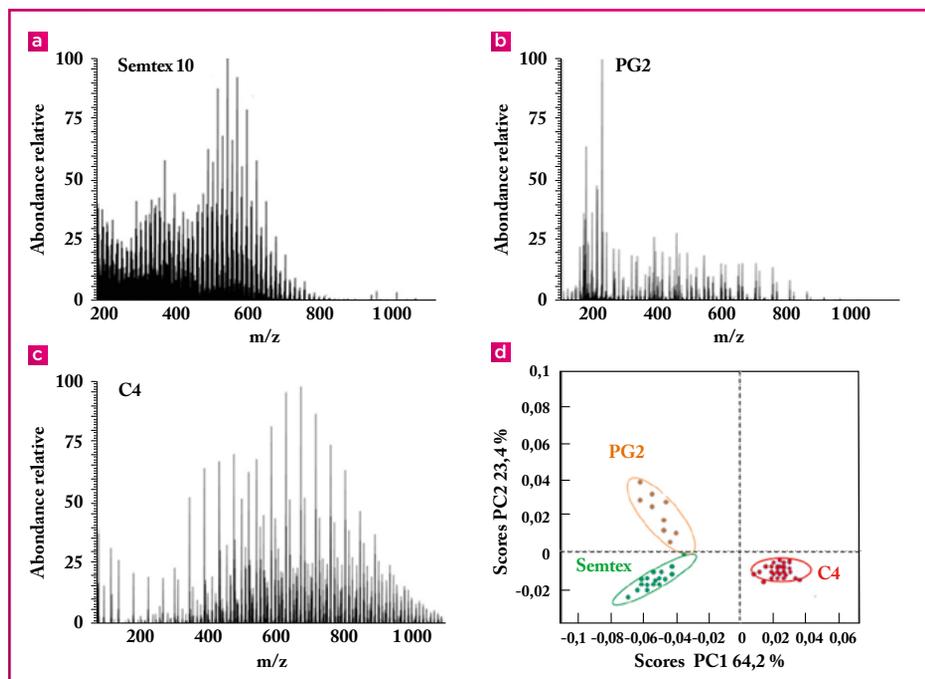


Figure 2

➔ Les spectres de masse des explosifs plastiques (a) Semtex 10, (b) PG2 et (c) C4 (traces récupérées et analysées directement à la surface des frottis) constituent de véritables empreintes moléculaires permettant d'identifier de manière univoque et rapide ces explosifs plastiques. Ils révèlent de précieuses informations quant à la nature, la source et l'origine potentielles des explosifs utilisés sur une scène de crime (lieu d'attentat ou autre). (d) Le traitement statistique des données développé au CEA – DAM Île-de-France permet de discriminer les explosifs plastiques en fonction de leur composition moléculaire dans des délais beaucoup plus rapides, de l'ordre de quelques minutes.

Les particules de taille micrométrique présentes à la surface des frottis sont ensuite analysées au laboratoire du CEA – DAM Île-de-France en couplant le spectromètre de masse dit à trappe orbitale à un dispositif d'ionisation ambiante utilisant un flux d'azote chauffé et une décharge électrique. Les ions ainsi obtenus proviennent d'une désorption thermique de surface et d'une ionisation chimique. Ils produisent des spectres de masse caractéristiques de chaque type d'explosif (figure 2a et 2b) 5. Le spectromètre de masse à trappe orbitale donne accès à la masse exacte des ions (avec une grande précision), rendant ainsi possible l'attribution d'une formule chimique ($C_w H_x O_y N_z \dots$) pour chacun des ions du spectre.

Une méthode de représentation graphique automatisée a été développée par le CEA – DAM Île-de-France en utilisant la masse exacte de chaque espèce déterminée au dix millième. L'empreinte spectrale de chaque échantillon avant et après l'explosion peut ainsi être rapidement représentée graphiquement. Cette méthode a été appliquée à plusieurs formulations énergétiques plastiques, en combinaison avec une méthode statistique. Cette analyse permet très rapidement, en quelques minutes seulement contre

plusieurs heures pour une analyse manuelle, d'accéder aux caractéristiques moléculaires intrinsèques des échantillons, comme le type de polymère utilisé, la charge explosive ou encore la présence de plastifiants, et de discriminer les échantillons en fonction de leur composition chimique (figure 2d).

Cette méthode analytique innovante, combinant spectrométrie de masse haute

résolution, source d'ionisation atmosphérique et traitement de données statistiques, va plus loin que l'analyse exclusive des molécules intrinsèquement énergétiques en incluant notamment les polymères, huiles, cires, impuretés, etc. Son application dans un cadre de criminalistique chimique a permis de valider cette approche sur des échantillons réels.

RÉFÉRENCES

- 1 G. GAIFFE, R. B. COLE, A. SONNETTE, N. FLOCH, M. C. BRIDOUX, « Identification of post-blast residues by DART-HRMS combined with multivariate statistical analysis of the Kendrick mass defect », *Anal. Chem.*, **91**, 13, p. 8093-8100 (2019).
- 2 C. M. MAHONEY *et al.*, « Characterization of composition C4 explosives using time-of-flight secondary ion mass spectrometry and X-ray photoelectron spectroscopy », *Anal. Chem.*, **82**, p. 7237-7248 (2010).
- 3 G. GAIFFE, R. B. COLE, S. LACPATIA, M. C. BRIDOUX, « Characterization of fluorinated polymers by atmospheric-solid-analysis-probe high-resolution mass spectrometry (ASAP/HRMS) combined with Kendrick-mass-defect analysis », *Anal. Chem.*, **90**, p. 6035-6042 (2018).
- 4 J. D. HOWA *et al.*, « Isolation of components of plastic explosives for isotope ratio mass spectrometry », *Forensic Chem.*, **1**, p. 6-12 (2016).
- 5 M. C. BRIDOUX *et al.*, « Combined use of direct analysis in real-time/Orbitrap mass spectrometry and micro-Raman spectroscopy for the comprehensive characterization of real explosive samples », *Anal. Bioanal. Chem.*, **408**, p. 5677-5687 (2016).

N. Richard
CEA – DAM Île-de-France

L. Giacomazzi
Materials Research Laboratory, University of Nova Gorica, Ajdovscina, Slovénie

N. S. Shcheblanov
Laboratoire Navier, UMR 8205 CNRS – École des ponts ParisTech – Institut français des sciences et technologies des transports et de l'aménagement des réseaux (IFSTTAR) – Université Paris-Est, Marne-la-Vallée

L. Martin-Samos
Istituto officina dei materiali, Democritos
National Simulation Center, Trieste, Italie

N. Ollier
Laboratoire des solides irradiés, UMR 7642 CEA –
CNRS – École polytechnique, Palaiseau

VERS UNE CONNAISSANCE MICROSCOPIQUE DE LA STRUCTURE DES VERRES DE PHOSPHATE P_2O_5

Les propriétés d'amplification de la lumière des ions terres rares permettent, en les incluant comme dopant dans le cœur des fibres optiques, d'obtenir des sources laser et des amplificateurs de lumière compacts. Pour réduire la tendance à l'agrégation de ces ions, qui diminue leurs propriétés amplificatrices, le phosphore est employé comme co-dopant dans ces fibres. Cet article montre comment les méthodes de simulation à l'échelle atomique peuvent aider à l'optimisation de ce co-dopage en contribuant à une meilleure compréhension de la structure des verres phosphates **1** et des défauts qui leur sont liés **2**. Au CEA – DAM, ces résultats serviront aussi dans le cadre d'études sur le développement de fibres optiques pour des mesures de dosimétrie radiative.

Les verres de silice et de phosphate possèdent de nombreuses propriétés intéressantes directement liées à leur composition. Ils peuvent être employés dans les fibres optiques grâce à leurs bonnes propriétés optiques et mécaniques. Le dopage au phosphore de la silice ou l'utilisation de verres de phosphate aident à l'inclusion sans agrégation d'ions terres rares, ouvrant la possibilité d'utiliser ces fibres comme amplificateurs de lumière. Pour optimiser ces effets, la physico-chimie des matrices vitreuses et des défauts liés au phosphore doit être maîtrisée. L'utilisation de simulations à l'échelle atomique dite *ab initio* peut apporter de nouvelles connaissances sur ces verres. Ces méthodes permettent d'accéder sans paramètre empirique à la structure électronique et atomique des matériaux. Si la génération par simulation de modèles de verre de silice permet de bien reproduire les propriétés des verres réels, celle des verres phosphates P_2O_5 est moins bien maîtrisée. La structure des verres P_2O_5 est composée de tétraèdres PO_4 formés par des liaisons O-P-O (**figure 1a**). Pour former cette structure vitreuse, ces tétraèdres sont reliés entre eux par des liaisons P-O-P. On dit dans ce cas que l'oxygène est pontant. La pentavalence du phosphore, c'est-à-dire le fait qu'il doit normalement former cinq liaisons, fait qu'au moins un des oxygènes du tétraèdre ne forme pas cette liaison P-O-P afin de garder l'électronéutralité de l'ensemble du P_2O_5 . Cet atome est alors dit non pontant. Différents types de tétraèdres

peuvent donc exister et ils sont communément nommés Q^n si on désigne par Q^n un tétraèdre PO_4 , avec n ($2 \leq n \leq 4$) le nombre de connexions P-O-P par tétraèdre (**figure 1b**).

Dans cette étude **1**, trois modèles de ce verre ont été créés par simulation : deux, appelés RMC1 et RMC2 (RMC pour *Reverse Monte Carlo*), en utilisant des contraintes de départ différentes ; le troisième est appelé CMD (sigle anglais signifiant dynamique moléculaire classique). La répartition des Q^n est très différente dans les trois modèles (**figure 1b**) : RMC1 et RMC2 ont la plus grande proportion d'unité Q^3 jamais reportée dans la littérature (100 % et 87,5 % respectivement), alors que le modèle CMD en possède un nombre similaire à ceux de la littérature. Si l'on regarde seulement les critères de caractérisation des verres classiquement utilisés dans la littérature, peu de différences ressortent. Dans cette étude, l'utilisation de calculs *ab initio* a permis d'obtenir pour la première fois les spectres de vibration de ces modèles de verre, c'est-à-dire l'intensité des modes de vibration des atomes en fonction de la fréquence. En effet, dans une structure atomique, tous les atomes ont tendance à vibrer selon des modes caractéristiques autour de leur position d'équilibre. Sur la **figure 1c** est présentée la densité d'états vibrationnels (VDOS) *ab initio* des trois modèles, comparée à un spectre expérimental issu de **3**. À part dans les zones en dessous de 100 cm^{-1} et au-dessus de 1380 cm^{-1} , généralement mal reproduites par la simulation, tous les

modèles reproduisent qualitativement bien les principales caractéristiques du spectre expérimental en ce qui concerne les pics de vibration. Malgré tout, quantitativement, c'est-à-dire en ce qui concerne l'alignement de la position des pics calculés avec celle des pics expérimentaux, il apparaît que le modèle CMD a tendance à décaler fortement les hautes fréquences, RMC2 à décaler un peu les hautes mais aussi les moyennes fréquences, alors que RMC1 reproduit bien les différents pics du spectre expérimental. Une décomposition de ce spectre par projection des modes de vibration sur les unités structurales Q^n correspondantes a alors été réalisée et montre que les unités Q^2 et Q^4 ont tendance à déformer le spectre de vibration entre 650 et 1450 cm^{-1} , induisant ainsi ces décalages par rapport au spectre expérimental. Le taux élevé de Q^3 présent dans le modèle RMC1 semblerait donc essentiel pour reproduire la physique de P_2O_5 , mais aussi de verres phosphates plus complexes.

Ce modèle pourra donc servir de point de départ à de nouvelles études *ab initio* sur ce matériau, permettant de mieux comprendre et d'améliorer ses propriétés, par exemple au travers de l'étude des défauts liés au phosphore.

Cela avait déjà été fait dans un verre de silice (SiO_2) avec l'étude du défaut POHC (*Phosphorous Oxygen Hole Center*), qui peut être à l'origine de pertes d'efficacité lumineuse des fibres optiques. Le POHC est formé par deux atomes d'oxygène non pontants liés au même atome de phosphore. Des calculs *ab initio* ont permis d'obtenir des caractéristiques typiques de ce genre de défaut POHC dans différents modèles de silice dopée au phosphore. Parmi eux, le modèle partageant au moins un coin de son tétraèdre avec un autre tétraèdre PO_4 (figure 2) donne des valeurs s'accordant le mieux avec les observations expérimentales comparées à la littérature théorique qui ne considérait qu'un tétraèdre phosphate

isolé [4]. Le défaut POHC serait donc constitué par l'agrégation d'au moins deux tétraèdres phosphates. Ces résultats théoriques offrent des perspectives intéressantes pour le développement optimisé d'amplificateurs de lumière et de dosimètres fibrés.

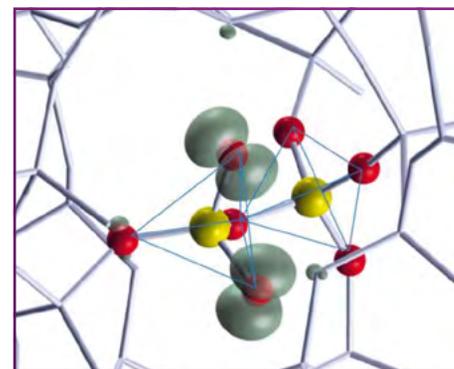


Figure 2

➔ Densité électronique de la structure se basant sur un complexe $[(O-),P(=O)]$ partageant au moins un coin de son tétraèdre avec un autre tétraèdre phosphate. Les tétraèdres sont mis en valeur par des traits bleus, les atomes de phosphore et d'oxygène appartenant aux complexes phosphates sont en jaune et en rouge respectivement, le reste de la structure de silice est en gris clair. Les lobes en gris foncé représentent la densité électronique des électrons non appariés liés aux liaisons non pontantes des deux oxygènes constituant le défaut *Phosphorous Oxygen Hole Center* (POHC).

RÉFÉRENCES

- 1 N. S. SHCHEBLANOV, L. GIACOMAZZI, M. E. POVARNITSYN, S. KOHARA, L. MARTIN-SAMOS, G. MOUNTJOY, R. J. NEWPORT, R. C. HAWORTH, N. RICHARD, N. OLLIER, « Vibrational and structural properties of P_2O_5 glass: Advances from a combined modeling approach », *Phys. Rev. B*, **100**, 134309 (2019).
- 2 L. GIACOMAZZI, L. MARTIN-SAMOS, A. ALESSI, N. RICHARD *et al.*, « $v\text{-P}_2\text{O}_5$ micro-clustering in P-doped silica studied by a first-principles Raman investigation », *Scientific Report*, **9**, p. 7126 (2019).
- 3 R. HAWORTH *et al.*, « Dynamics, dynamical systems, lattice effects, quantum solids-probing vibrational modes in silica glass using inelastic neutron scattering with mass contrast », *Phys. Rev. B*, **81**, 060301(R) (2010).
- 4 M. FANCIULLI *et al.*, « Phosphorous-oxygen hole centers in phosphosilicate glass films », *Phys. Rev. B*, **74**, 134102 (2006).

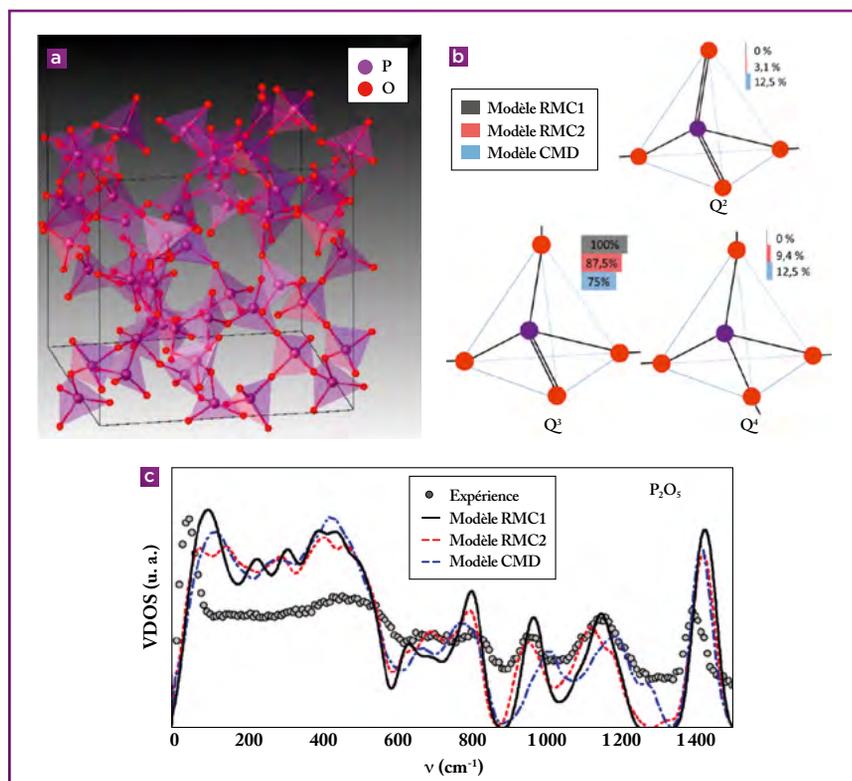


Figure 1

➔ (a) Structure du verre de phosphate (ici le modèle appelé RMC1). Les atomes de phosphore sont en violet, les atomes d'oxygène en rouge. (b) Structures des trois types de tétraèdres présents dans les trois modèles de verre de P_2O_5 obtenus par simulation en fonction de leur Q^n ($2 \leq n \leq 4$) et leur distribution dans chaque modèle en pourcentage. Les traits noirs indiquent une liaison simple, les doubles traits une double liaison et les traits bleus représentent symboliquement les tétraèdres. (c) Densité d'états de vibration (VDOS) en fonction de la fréquence pour les différents modèles de verre comparés à des résultats expérimentaux. Pour l'accord entre les modèles et l'expérience, voir le texte.

R. Bossu, A. Dupont
CEA – DAM Île-de-France

R. Steed
Centre sismologique euroméditerranéen (CSEM), Bruyères-le-Châtel

I. Bondár
Académie des sciences de Hongrie

A. Heinloo, J. Saul, A. Strollo
German Research Centre for Geoscience, Potsdam, Allemagne

LES TÉMOINS AU SECOURS DES LOCALISATIONS SISMIQUES

En sismologie, comme dans beaucoup de domaines, l'information se doit d'être toujours plus rapide et fiable. L'analyse combinée de l'empreinte numérique laissée par les témoins de tremblements de terre et des données issues des stations sismiques optimise, à moindre coût, les performances des réseaux de surveillance et améliore ainsi la pertinence de l'information sismologique à destination du public. Testée sur le réseau global Geofon, cette approche, appelée CsLoc pour *Crowdsourced Seismic Location*, divise par quatre en valeur médiane le délai de localisation sans pour autant en augmenter les incertitudes (environ 12 km) **1**. Un service opérationnel global est en développement avec pour objectif de localiser la majorité des séismes ressentis en moins d'une minute. Cette information est utile tant pour le Centre national d'alerte au tsunami (Cenalt) que pour la surveillance sismique métropolitaine. Elle s'inscrit dans la poursuite de localisations toujours plus rapides et précises communes à plusieurs des missions du CEA – DAM, notamment la surveillance des tsunamis et de la sismicité métropolitaine **2,3**.

Les stations sismologiques qui mesurent les mouvements du sol sont particulièrement sensibles. Elles détectent aussi bien le passage des ondes de tout séisme de magnitude supérieure ou égale à 5 frappant notre planète, que des séismes plus petits et plus proches, sans oublier les bruits, qu'ils soient naturels ou anthropiques (tirs de carrière, passage d'animaux, etc.). L'approche classique de localisation des séismes fusionne les temps de passage des ondes détectées par plusieurs stations pour identifier la localisation de leur source et l'heure à laquelle les ondes ont été émises, soit quatre inconnues : X, Y, Z et T. Afin d'éviter que la fusion de temps d'arrivée de sources différentes conduise à des artefacts, un nombre minimum de temps d'arrivée est généralement imposé (30 dans le cas du réseau Geofon utilisé dans cette étude) et le domaine des

l'information sismologique à destination du public. Testée sur le réseau global Geofon, cette approche, appelée CsLoc pour *Crowdsourced Seismic Location*, divise par quatre en valeur médiane le délai de localisation sans pour autant en augmenter les incertitudes (environ 12 km) **1**. Un service opérationnel global est en développement avec pour objectif de localiser la majorité des séismes ressentis en moins d'une minute. Cette information est utile tant pour le Centre national d'alerte au tsunami (Cenalt) que pour la surveillance sismique métropolitaine. Elle s'inscrit dans la poursuite de localisations toujours plus rapides et précises communes à plusieurs des missions du CEA – DAM, notamment la surveillance des tsunamis et de la sismicité métropolitaine **2,3**.

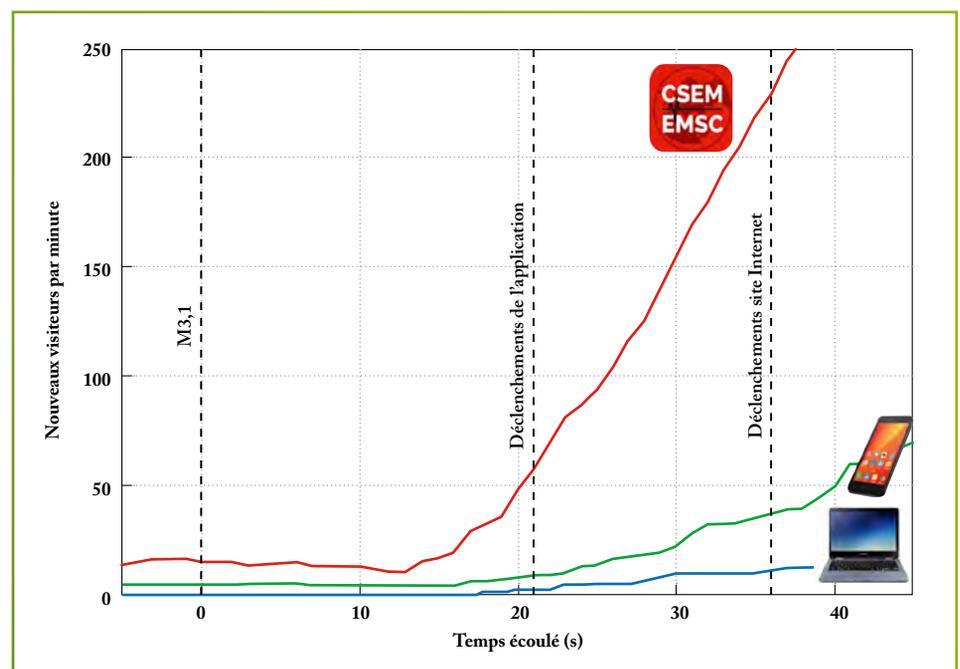


Figure 1

➔ Évolution temporelle du nombre de visiteurs sur le site Internet du Centre sismologique euroméditerranéen pour ordinateurs de bureau (bleu), pour appareils nomades (vert) et du nombre de lancements de l'application LastQuake (rouge) après un séisme ressenti de magnitude 3.1. La première détection « crowdsourcée » de ce séisme a été réalisée en une vingtaine de secondes grâce aux lancements de LastQuake.

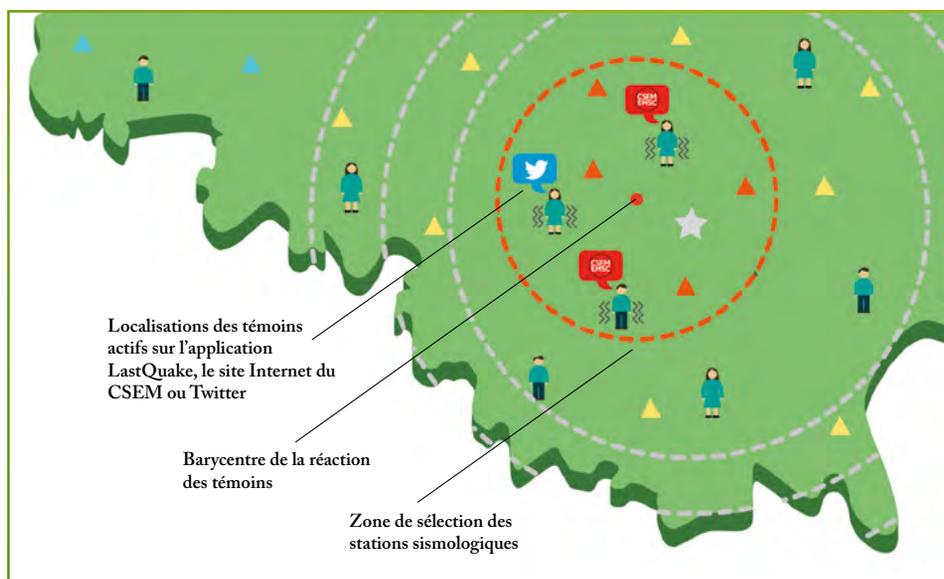


Figure 2

➔ La localisation de la réaction en ligne des témoins déclenche la sélection des stations sismologiques (triangles rouges) susceptibles d'avoir détecté le séisme, et l'heure de cette réaction détermine la fenêtre temporelle du signal à exploiter. Si une localisation ne peut être déterminée à la première itération, les données de stations plus distantes (triangles jaunes) sont intégrées au calcul.

solutions est exploré en détail pour éviter les minima locaux. Cette stratégie, indispensable pour assurer la fiabilité des localisations automatiques, est coûteuse en temps et impose un nombre minimum d'observations, nettement supérieur aux quatre théoriquement requises pour résoudre l'équation, réduit la capacité de détection du réseau. En injectant dans le processus de localisation une information géographique et temporelle indépendante, dérivée de l'empreinte numérique laissée par les témoins, CsLoc s'affranchit en grande partie de ces limitations.

EMPREINTE NUMÉRIQUE DES TÉMOINS DE SÉISMES

Lorsqu'un séisme frappe, les témoins se ruent sur Internet à la recherche d'informations sur la cause de cette secousse. Certains envoient un *tweet*, d'autres visitent les sites spécialisés ou, pour ceux qui en possèdent, lancent une application smartphone dédiée. Le Centre sismologique euroméditerranéen est une association hébergée au CEA-DAM Île-de-France et l'un des premiers centres d'information sismologique au monde. Il surveille en temps réel le nombre de *tweets* publiés contenant le mot « séisme » en une soixantaine de langues, l'évolution du nombre de visiteurs sur son propre site Internet et du nombre de lancements de son application pour smartphone LastQuake afin de détecter les séismes ressentis (figure 1) 4. Il suffit alors de déterminer d'où viennent ces témoins pour savoir

où et quand une secousse a été ressentie. Ces détections, dites « crowdsourcées », c'est-à-dire provenant du public, se produisent typiquement de 15 à 90 secondes après le séisme et devançant généralement les premières localisations sismiques par le traitement « classique ».

L'APPROCHE CsLoc

Chaque détection « crowdsourcée » lance une requête automatique auprès des 800 stations du réseau global Geofon, collecte les temps de passage des ondes déjà observées dans les stations de la région identifiée et, dans les deux minutes précédant cette détection, exclut les observations incompatibles avec les vitesses de propagation des ondes sismiques avant d'amorcer un processus classique de localisation sismique. Si la solution satisfait aux critères de qualité, elle est publiée; dans le cas contraire, le processus est itératif et une nouvelle requête est lancée (figure 2).

En valeur médiane, les localisations sont disponibles en 108 s, comparées à 396 s pour le traitement classique, pour une incertitude de 12 km et un taux de faux positifs (détections crowdsourcées erronées conduisant à une localisation supposée valide) de 0,15 %. Sur les 735 séismes localisés par CsLoc, seuls 429 l'avaient été par Geofon en moins de dix minutes 1.

Cette approche ne peut résoudre les problèmes de latence (30 s sont nécessaires pour obtenir les observations de Geofon) ou de couverture spatiale (sans station, pas de localisation possible), mais optimise néanmoins à moindre coût ses performances. Elle ne concerne, bien sûr, que les séismes ressentis, qui sont néanmoins les seuls pour lesquels la rapidité de publication est importante.

Un service opérationnel intégrant plus de stations et des itérations plus rapides est en test: il devrait atteindre un délai de publication médian inférieur à la minute à l'échelle globale.

RÉFÉRENCES

- 1 R. J. STEED, A. FUENZALIDA, R. BOSSU, I. BONDÁR, A. HEINLOO, A. DUPONT, J. SAUL, A. STROLLO, « Crowdsourcing triggers rapid, reliable earthquake locations », *Science Advances*, **5**, p. 1-6 (2019).
- 2 COLLECTIF DU CEA – DAM, *Aléas en géoscience, revue chocs*, **45**, 96 p. (2014).
- 3 COLLECTIF DU CEA – DAM, *Détection des essais nucléaires – À l'écoute du globe, revue chocs*, **50**, 112 p. (2020).
- 4 R. BOSSU *et al.*, « LastQuake: From rapid information to global seismic risk reduction », *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **28**, p. 32-42 (2018).

MÉTASTABILITÉ ET RÉACTIVITÉ DES ALLIAGES DE PLUTONIUM EN PHASE δ

Le plutonium a la particularité d'exister sous six phases cristallines différentes, de la température ambiante jusqu'à son point de fusion, présentant ainsi une des métallurgies les plus complexes de la classification périodique. Plus ductile et donc plus facilement usinable, la phase δ , de structure cubique à faces centrées, est donc métallurgiquement la plus intéressante. Elle est maintenue à température ambiante par ajout de gallium, mais l'alliage obtenu n'est que métastable. De plus, il présente une réactivité surfacique importante et requiert donc une bonne maîtrise des conditions de stockage à plus ou moins long terme pour limiter le processus d'oxydation. Caractériser et comprendre les mécanismes de stabilisation et de corrosion ont constitué l'objectif des travaux réalisés au CEA – Valduc 1,2.

L'étude de la stabilité de la phase δ des alliages de plutonium est un sujet essentiel au CEA – DAM, car, lors d'un abaissement de température sous contrainte, la phase δ peut présenter dans certaines conditions de contrainte et de température une transformation de phase générant une phase α' fragile. Cette transformation, appelée transformation martensitique, s'accompagne d'une contraction volumique de l'ordre de 20 %. Un tel changement de volume peut affecter la structuration des pièces

mises en forme. L'objectif de cette étude est de quantifier les marges disponibles pour rester dans la phase δ . C'est pourquoi l'impact de l'application d'une contrainte externe à basse température sur des échantillons en phase δ a été étudié 1. Plusieurs porte-échantillons adaptés aux appareillages de dilatométrie et de diffraction des rayons X (DRX) en boîte à gants ont été mis au point. Cette étude a permis de comprendre à partir de quand et comment une contrainte appliquée dans le domaine élastique provoque cette transformation martensitique au travers d'un

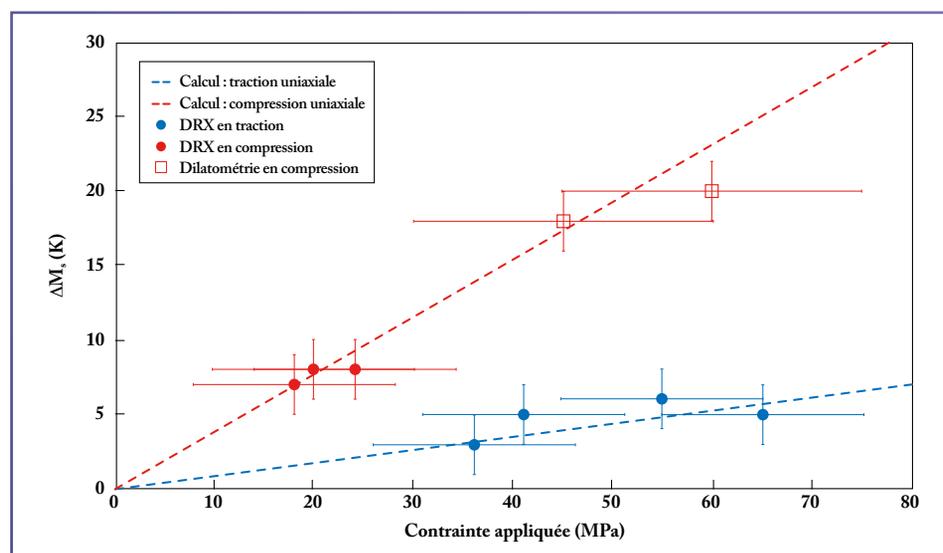


Figure 1

➤ Mesures expérimentales et théoriques (traits en pointillés) de la variation de la température de début de transformation martensitique M_s lors de l'application d'une contrainte uniaxiale de traction et de compression montrant l'influence de cette dernière sur les variations de la limite de stabilité en température de la phase δ . Les données théoriques ont été calculées à partir du modèle de Patel et d'un modèle micromécanique décrivant la transition de la phase δ en phase α' et présentent un très bon accord avec les mesures expérimentales, validant la modélisation du processus thermomécanique à l'origine de la transformation martensitique des alliages de Pu en phase δ .

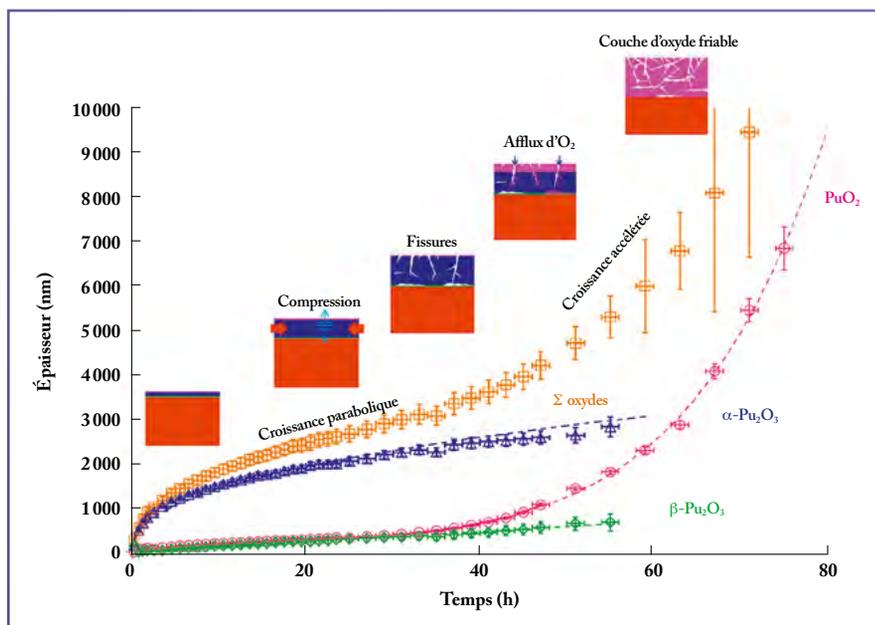


Figure 2

➔ Nature et cinétique de croissance de la couche d'oxyde du plutonium se formant au cours d'une exposition à 200 °C sous 100 mbar d'oxygène, obtenues expérimentalement *via* une caractérisation en continu par diffraction des rayons X *in situ*. La couche d'oxyde se compose des oxydes α et β du Pu_2O_3 et du PuO_2 . Si la couche β du Pu_2O_3 reste fine, la cinétique de croissance parabolique est principalement assurée par la formation de la phase α du Pu_2O_3 , dans laquelle se développe un état de contrainte en compression provoquant des fissures à l'origine de la création de courts-circuits de diffusion de l'oxygène. L'afflux d'oxygène est responsable du phénomène de croissance accélérée résultant exclusivement de la croissance très rapide de la couche de PuO_2 .

apport plus ou moins important d'énergie mécanique appelée force motrice. Ainsi, afin d'évaluer la limite de stabilité de la phase δ sous contrainte, les variations non négligeables de température notée M_s , correspondant à la température de déclenchement de transformation martensitique, ont été caractérisées expérimentalement en fonction de la contrainte uniaxiale appliquée. Ces dernières (figure 1) sont voisines de celles qui ont été calculées à partir du modèle de Patel et Cohen développé pour les alliages FeNi et d'un modèle micromécanique décrivant la transition de la phase δ en phase α' . Cette étude a également permis de révéler plus finement que, si une contrainte de compression uniaxiale apporte toujours plus ou moins de force motrice pour la transformation selon l'orientation des grains de phase δ avec la direction d'application de la contrainte, un effort de traction peut, selon ces différentes orientations, favoriser cette transformation ou inversement stabiliser certains grains en phase δ .

Il demeure cependant que lors de l'application d'une sollicitation mécanique dans le domaine de déformation plastique, un autre chemin de transformation plus complexe est emprunté et mène à l'émergence d'une nouvelle phase transitoire γ' orthorhombique à faces centrées; ce processus de transformation reste à élucider. Les alliages de plutonium sont également très réactifs et donc très sensibles à l'oxydation. Une atmosphère de stockage mal adaptée peut mener à une corrosion sévère, voire à la réduction complète d'un échantillon en poudre d'oxyde. Afin de contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes du processus d'oxydation de la phase δ , une étude de la cinétique d'oxydation *in situ* par DRX a été réalisée [2] au cours d'expositions isothermes sous oxygène (figure 2). L'analyse des phases constituant la couche d'oxyde a mis en évidence la présence de l'oxyde PuO_2 ainsi que les phases α et β du Pu_2O_3 . Les cinétiques de croissance de la couche d'oxyde semblent clairement se compo-

ser d'une étape de croissance parabolique suivie d'une étape de croissance linéaire caractéristique d'une accélération de la vitesse d'oxydation. Au cours de l'étape de croissance parabolique correspondant à un ralentissement progressif de la vitesse de corrosion, l'augmentation de l'épaisseur totale de la couche d'oxyde résulte principalement de la croissance de la couche de la phase α du Pu_2O_3 . La variation de la maille cristalline de la phase α du Pu_2O_3 avec son épaissement correspond au développement d'un état de contrainte de compression dans cette phase induit par la différence de volume molaire entre l'oxyde formé et l'alliage. Ces contraintes de compression dans l'oxyde augmentent jusqu'à ce qu'elles soient suffisantes pour contrebalancer les forces d'adhésion. La couche d'oxyde relaxe alors les contraintes par l'apparition de fissures. Une telle microstructure induit donc la création de courts-circuits de diffusion de l'oxygène, celui-ci n'ayant plus besoin de diffuser à travers les structures cristallines des différentes couches d'oxyde pour aller oxyder le plutonium. Il s'ensuit une étape de croissance accélérée dont la transition (point d'inflexion appelé *breakaway*) est assurée par la forte croissance de la couche de PuO_2 , cet oxyde étant le plus stable vis-à-vis d'un apport massif en oxygène. La maîtrise de la teneur en oxygène de l'atmosphère en boîte à gants est donc indispensable à la garantie de l'intégrité des alliages de plutonium.

RÉFÉRENCES

- 1 B. RAVAT *et al.*, « Phase transformations in PuGa 1 at. % alloy: Influence of stress on $\delta \rightarrow \alpha'$ martensitic transformation at low temperatures », *Materialia*, **6**, 100304 (2019).
- 2 B. RAVAT *et al.*, « New insight into δ -Pu alloy oxidation kinetics highlighted by using *in situ* X-ray diffraction coupled with an original Rietveld refinement method », *Corr. Sci.*, **138**, p.66-74 (2018).

COMPORTEMENT ÉLECTROCHIMIQUE DU PLUTONIUM DANS LES MILIEUX DE FLUORURES FONDUS

Un procédé pyrochimique (haute température) de traitement de sous-produits contenant du plutonium piégé dans une matrice saline fluorée (CaF_2) est en cours de développement au CEA – Valduc. Il s'appuie sur des réactions d'oxydo-réduction intervenant dans un sel fondu fluoré ou chlorofluoré à une température comprise entre 800 et 1000 °C. Les propriétés thermodynamiques du plutonium dans ce type de solvant étant méconnues, leur acquisition a été entreprise grâce à l'utilisation de techniques électrochimiques **1**. Ces données permettront d'accéder à la compréhension des mécanismes chimiques à l'œuvre, indispensable à la maîtrise et au dimensionnement du procédé.

Les procédés pyrochimiques en milieu de sels fondus sont couramment utilisés pour produire des métaux que l'on ne peut pas obtenir en milieu aqueux, comme l'aluminium fabriqué depuis plus d'un siècle à l'aide d'un procédé électrochimique. Ces milieux étant exempts d'hydrogène, ils permettent de gérer plus facilement le risque de criticité et sont plus compacts. Ils sont à ce titre considérés comme une option prometteuse pour traiter des combustibles nucléaires usés ainsi que certains produits ou déchets contenant des actinides. Dans ce cadre, le CEA – Valduc s'intéresse au traitement d'une famille spécifique de produits constitués d'une matrice de fluorure de calcium (CaF_2)

contenant de l'oxyde de calcium (CaO) et des composés de plutonium. Le CaF_2 et le CaO confèrent à ce type de produit des propriétés réfractaires avec un point de fusion très élevé, supérieur à 1300 °C. Le traitement envisagé consiste dans un premier temps à obtenir un bain fondu à une température plus adaptée (inférieure à 1000 °C) par l'ajout d'un fondant, le chlorure de calcium (CaCl_2). Il s'agit ensuite de réduire, à l'aide de calcium (Ca), les différents composés de plutonium sous sa forme métallique. Le métal formé, non miscible avec la phase saline, décante à chaud avant d'être séparé du sel après refroidissement. Pour mener à bien le développement du procédé, la connaissance des propriétés thermodynamiques

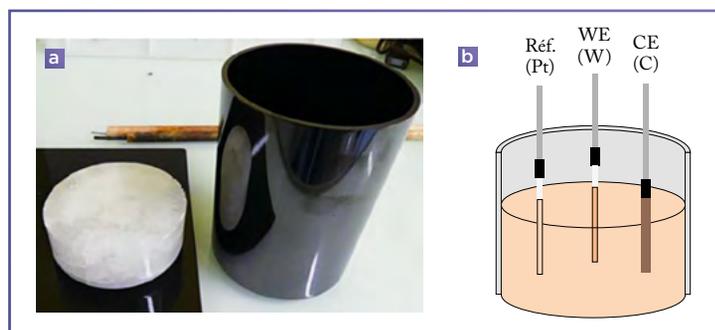


Figure 1

➤ Dispositif expérimental mis en œuvre lors de l'acquisition de données thermodynamiques décrivant le comportement électrochimique du plutonium en milieu de fluorures fondus. (a) Photographie comportant au premier plan un mélange de sels LiF-CaF_2 recristallisé à froid après fusion ainsi qu'un creuset en carbone vitreux, et en arrière-plan les électrodes de mesure. (b) Schéma du creuset contenant le mélange de sels fondus où plongent les trois électrodes : une électrode de référence (Réf.) en platine (Pt), une électrode de travail (WE) en tungstène (W) et une contre-électrode (CE) en carbone vitreux (C).

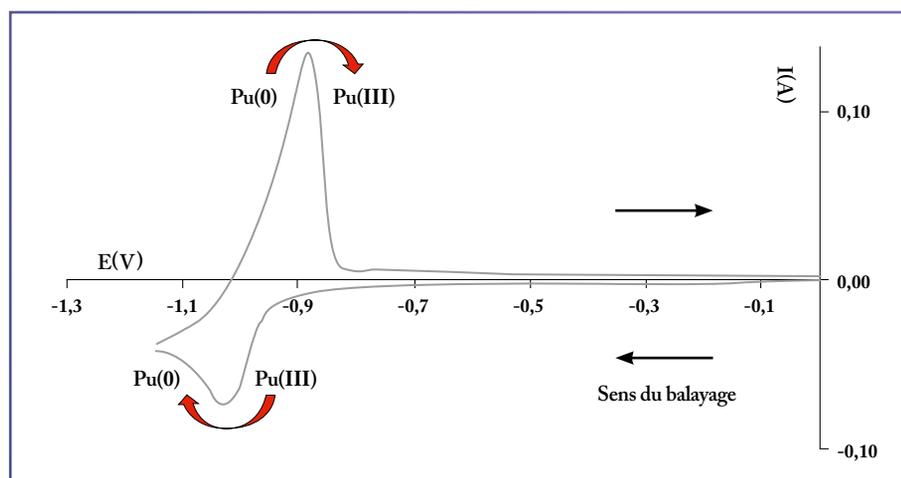


Figure 2

➔ Voltammogramme cyclique représentatif de la réduction du plutonium dans $\text{LiF-CaF}_2\text{-PuF}_4$ à 840 °C. Cette technique consiste à étudier des réactions électrochimiques en faisant varier le potentiel E (en volts) de l'électrode de travail par rapport à une électrode de référence. Les réactions donnent une réponse en intensité I (en ampères) de valeur négative (resp. positive) s'il s'agit d'une réduction (resp. oxydation). Ce graphique montre une vague d'intensité négative correspondant au dépôt de plutonium métallique sur l'électrode de travail. Vers $-1,1$ V, le sens du balayage est inversé afin d'observer une forme de pic caractéristique d'un « décapage » électrochimique : comme le métal déposé sur l'électrode s'oxyde et se dissout, l'intensité mesurée augmente rapidement puis chute brutalement lorsque la surface de l'électrode est « décapée ».

du plutonium dans ce type de solvant fondu est essentielle, et les données de base sont manquantes.

Le milieu réactionnel, caractérisé par le sel fondu chlorofluoré dans lequel est effectuée l'extraction, est complexe et peu connu. De ce fait, la méthode choisie consiste à étudier le comportement du plutonium dans un milieu simplifié à l'aide de techniques d'électrochimie analytique, afin de faciliter la compréhension des mécanismes mis en jeu. Ce type d'étude ayant déjà été publié pour les milieux de chlorures fondus [2], l'investigation s'est portée sur les milieux de fluorures fondus. Le solvant choisi est un mélange connu de deux sels fluorés, LiF et CaF_2 , fondus à 840 °C dans un creuset en carbone vitreux sous atmosphère inerte (argon). Le plutonium (PuF_4) est introduit dans le bain de sels sous la forme de poudre. Le dispositif électrochimique utilisé dans l'expérience est un montage à trois électrodes (figure 1).

Afin d'anticiper les différentes réactions se produisant dans ce milieu à 840 °C, un diagramme de stabilité des espèces de plutonium a été établi grâce à des calculs thermodynamiques basés sur les propriétés disponibles des corps purs [3]. Le diagramme de stabilité théorique montre que seulement deux nombres d'oxydation (N. O.) du plutonium sont stables dans les conditions opératoires : le plutonium métallique noté Pu(0) , qui est la forme recherchée *in fine*, et l'espèce solvatée notée Pu(III) . Ces résul-

tats ont été vérifiés expérimentalement à l'aide du montage de la figure 1.

Parmi les différentes techniques électrochimiques mises en œuvre lors des essais, citons la voltammétrie cyclique, technique d'analyse non destructive capable de fournir une « photographie » des espèces électroactives en solution dans le milieu. Le voltammogramme obtenu est alors caractéristique du milieu d'étude (figure 2). Celui-ci met en évidence un unique couple oxydant-réducteur Pu(III)/Pu(0) [1]. La forme de la courbe obtenue est typique du dépôt de plutonium métallique. Une technique analogue, la voltammétrie à vague carrée, a permis de déterminer que trois électrons sont échangés lors de la réaction menant au dépôt de plutonium métallique Pu(0) .

Ces résultats expérimentaux sont cohérents avec l'étude thermodynamique théorique : seuls le Pu(III) et le Pu(0) sont stables dans les conditions de l'étude, et la réduction de l'espèce solvatée Pu(III) en

plutonium métallique s'effectue en une seule étape selon la réaction : $\text{Pu}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Pu}$. Ils confortent également le choix du procédé : le plutonium en solution peut facilement être réduit par des métaux très électro-négatifs tels que le calcium.

L'exploitation des résultats expérimentaux à l'aide des outils théoriques de l'électrochimie analytique a permis d'acquérir des données thermodynamiques telles que le potentiel standard du couple Pu^{3+}/Pu , les coefficients de diffusion ou d'activité de l'ion Pu(III) pour différentes concentrations dans la gamme de température d'intérêt. Ces résultats servent de référence avant d'aborder des milieux plus complexes comme les bains chlorofluorés. Le mécanisme de formation du plutonium métallique dans ces milieux sera ainsi vérifié et validé sur des produits de synthèse représentatifs de produits réels, en évaluant l'influence de l'oxygène présent dans le milieu sous diverses formes.

RÉFÉRENCES

- 1 J. CLAQUESIN, O. LEMOINE, M. GIBILARO, L. MASSOT, P. CHAMELOT, G. BOURGÈS, « Electrochemical behavior of plutonium fluoride species in LiF-CaF_2 eutectic melt », *Electrochimica Acta*, **301**, p. 80-86 (2019).
- 2 D. LAMBERTIN, S. CHED'HOMME, G. BOURGÈS, S. SANCHEZ, G. PICARD, « Plutonium chemical properties in NaCl-KCl and CaCl_2 at 1 073 K », *Journal of Nuclear Materials*, **341**, p. 124-130 (2005).
- 3 Logiciel HSC Chemistry 6.1, Outo Kumpu Research (2006).

T. Piquero,
D. Rochais, P. David
CEA – Le Ripault

A. Baux, L. Nouvian, K. Arnaud, G. Chollon, S. Jacques
Laboratoire des composites thermostructuraux (LCTS), UMR 5801
CNRS – CEA – Safran Ceramics – Université de Bordeaux, Pessac

ÉLABORATION D'ARCHITECTURES ALVÉOLAIRES TiC-SiC

Les architectures céramiques alvéolaires à porosité intercommunicante sont envisagées comme récepteurs volumiques des futures centrales solaires à concentration. Ces structures possèdent de nombreuses propriétés qui doivent être ajustées pour répondre à un cahier des charges particulièrement complexe. Pour ce faire, une voie de fabrication possible des récepteurs est basée sur les techniques de dépôt chimique en phase vapeur, développées au CEA – Le Ripault, pour assurer la transformation du bois de balsa, qui possède une structure alvéolaire naturelle, en carbure de titane **1**. Une pyrolyse transforme le précurseur en carbone ; puis le dépôt chimique réactif en phase vapeur convertit la totalité du carbone en carbure de titane TiC ; enfin, la structure est renforcée par infiltration chimique en phase vapeur de carbure de silicium SiC. L'architecture alvéolaire du bois de balsa est conservée à toutes les étapes. L'apport du SiC améliore fortement la résistance à l'écrasement et la résistance à l'oxydation des structures.

La demande énergétique de la société est satisfaite de nos jours par l'utilisation d'énergies fossiles essentiellement. Le développement d'énergies propres renouvelables peut retarder leur épuisement progressif, comme l'énergie solaire, inépuisable. Les centrales solaires à concentration optique sont basées sur la concentration du rayonnement du Soleil à l'aide de miroirs dans un récepteur volumique. Le rôle du récepteur est d'absorber progressivement le rayonnement solaire concentré qui pénètre dans son épaisseur, de le convertir en chaleur et de transmettre cette chaleur le plus efficacement possible à un fluide caloporteur qui le traverse **2**. Les matériaux qui constituent le récepteur doivent posséder une porosité intercommunicante élevée, la taille des pores variant du millimètre

au micromètre. Ils doivent aussi résister mécaniquement à l'écrasement, absorber le rayonnement solaire, avoir une surface spécifique importante et une forte conductivité thermique afin d'assurer le transfert thermique dans l'épaisseur du récepteur. Comme les environnements de fonctionnement sont oxydants à haute température (1 000 °C à l'air), les matériaux doivent également être tolérants aux chocs thermiques et aux gradients thermiques, stables thermiquement et résister à l'oxydation, ce qui exclut le matériau carbone qui se consume à l'air dès 400 °C. Les matériaux céramiques peuvent répondre à ces besoins.

Le bois de balsa, originaire d'Amérique centrale, a une porosité intercommunicante naturelle élevée. Il peut ainsi jouer le rôle de précurseur de céramiques pour fabriquer des récepteurs. L'objec-

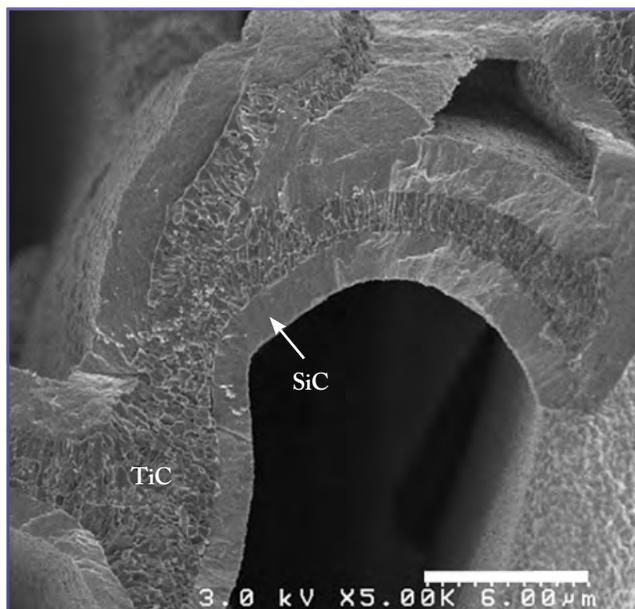


Figure 1

➔ Image réalisée par microscopie électronique à balayage, montrant la morphologie du multicouche TiC-SiC autour d'un macropore de balsa, et obtenue après les trois étapes de transformation du bois de balsa : pyrolyse de la structure du bois, RCVD du TiC et infiltration du SiC par CVI (RCVD pour *Reactive Chemical Vapour Deposition* et CVI pour *Chemical Vapour Infiltration*). Le carbone issu de la pyrolyse du balsa a été totalement transformé en TiC par RCVD. La couche de renforcement en SiC élaborée par CVI a une épaisseur de 1,5 µm et recouvre de manière uniforme le carbure de titane.

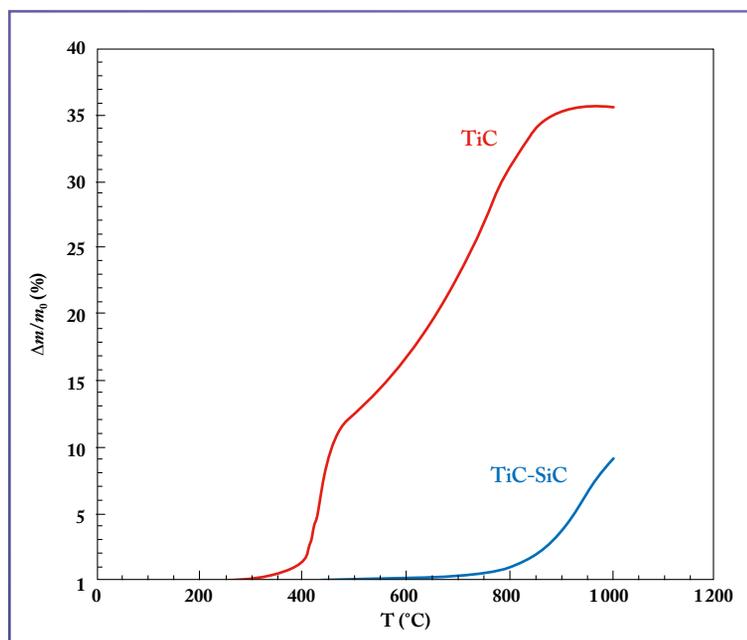


Figure 2

Évolution de la variation relative de masse des échantillons alvéolaires TiC et TiC-SiC en fonction de la température jusqu'à 1 000°C, dans un air sec. L'échantillon TiC commence à s'oxyder dès 350 °C. Le gain de masse associé à la transformation de TiC en TiO₂ augmente rapidement avec la température. L'échantillon est totalement oxydé à 850 °C, ce qui se traduit par l'apparition d'un palier jusqu'à 1 000 °C. Lorsque l'échantillon est renforcé par une couche de SiC, l'oxydation débute seulement à 750 °C. L'échantillon n'est pas totalement oxydé à 1 000°C: le carbure de silicium protège donc la couche de carbure de titane vis-à-vis de l'oxydation.

tif est de conserver cette architecture à toutes les étapes de la transformation. Une pyrolyse convertit d'abord le bois en carbone. Le carbone est remplacé par un matériau conducteur thermique et résistant à l'oxydation à haute température. À ce stade, le carbure de silicium (SiC) et le carbure de titane (TiC) sont deux céramiques réfractaires intéressantes **3**. D'un point de vue cinétique, la conversion totale du carbone ne peut être assurée que pour le TiC au moyen de la technique de dépôt chimique réactif en phase vapeur (RCVD pour *Reactive Chemical Vapour Deposition*) en utilisant le système TiCl₄/H₂. Les structures poreuses en TiC, encore fragiles à ce stade, sont renforcées avec un revêtement de SiC par infiltration chimique en phase vapeur (CVI pour *Chemical Vapour Infiltration*) en utilisant le système CH₃SiCl₃/H₂. Finalement, la structure poreuse du balsa est bien conservée et demeure sans défaut notable à toutes les étapes. La forte réactivité du carbone et la structure du balsa favorisent la diffusion des gaz et permettent la conversion complète en TiC par RCVD. La porosité macroscopique permet d'obtenir un dépôt uniforme de SiC à l'intérieur des macrocanaux (figure 1). La pénétration de SiC par CVI dans la microporosité assure un ancrage efficace de la couche de SiC.

La résistance à l'oxydation de l'échantillon TiC-SiC (après CVI) est beaucoup plus élevée que celle de l'échantillon TiC

pur (après RCVD) (figure 2). La conversion des structures de carbone par RCVD conduit à une forte augmentation de la résistance à l'écrasement grâce aux propriétés intrinsèques de TiC. La résistance est augmentée pour l'échantillon TiC-SiC en raison de l'infiltration de SiC par CVI. Les propriétés thermiques et d'écoulement des gaz des échantillons poreux TiC et TiC-SiC ont été examinées. La dilatation thermique est dominée par la contribution de TiC pour les deux matériaux. Les diffusivités thermiques à température ambiante et les conductivités thermiques des deux solides poreux sont voisines. Les mesures de perméabilité des échantillons poreux TiC et TiC-SiC, du fait de leur aptitude à se laisser traverser par un fluide, montrent

qu'ils répondent au critère d'efficacité des récepteurs solaires **3** pour la circulation de l'air à travers la porosité et la collecte de la chaleur accumulée dans les parois de la structure poreuse.

Cette étude s'inscrit dans une démarche mise en œuvre spécifiquement au CEA-Le Ripault et qui comporte deux étapes. La première consiste à optimiser une architecture alvéolaire de géométrie tridimensionnelle grâce à des outils de simulation numérique, afin de répondre le plus précisément possible à un cahier des charges relativement aux propriétés thermiques, mécaniques et thermomécaniques. La seconde étape consiste à élaborer ces structures « sur mesure » grâce à la fabrication additive **4**.

RÉFÉRENCES

- 1** A. BAUX *et al.*, « Synthesis and properties of multiscale porosity TiC-SiC Ceramics », *J. Am. Ceram. Soc.*, **39**, p. 2601-2616 (2019).
- 2** A. L. MARIN, « Volumetric receivers in solar thermal power plants with central receiver system technology: a review », *Solar Energy*, **85**, p. 891-910 (2011).
- 3** A. BAUX, *Synthèse de matériaux alvéolaires base carbures par transformation d'architectures carbonées ou céramiques par RCVD/CVD. Application aux récepteurs solaires volumiques*, thèse de doctorat soutenue le 25 octobre 2018 et délivrée par l'université de Bordeaux.
- 4** C. HEISEL, *Conception et réalisation, par fabrication additive, de matériaux cellulaires architecturés*, thèse de doctorat soutenue le 16 mai 2019 et délivrée par l'université de Limoges.

VERS DES MÉTHODES NUMÉRIQUES VALABLES DANS TOUS LES RÉGIMES DE COMPRESSIBILITÉ

Avec l'amélioration du caractère prédictif de la simulation numérique, des applications dans lesquelles plusieurs régimes de compressibilité interviennent peuvent être envisagées. C'est le cas des explosions sous-marines ou des ruptures de conduite en thermohydraulique. Cela peut également s'appliquer aux expériences de confinement inertiel d'une cible cryogénique du Laser Mégajoule, pour laquelle la phase de compression (régime compressible) est suivie d'une phase de stagnation (régime quasi incompressible) avant l'explosion (régime compressible). C'est pourquoi la question des méthodes numériques efficaces dans tous les régimes de compressibilité est pertinente. Le CEA – DAM Île-de-France propose une méthode numérique répondant à ce besoin **1**.

Comme l'indique le titre générique de ses revues scientifiques, le CEA – DAM s'intéresse aux chocs, notamment dans les écoulements, c'est-à-dire à des sauts de pression dans des matériaux compressibles. Dans le cadre du programme Simulation, il conçoit des modèles qui reproduisent fidèlement ces phénomènes, caractéristiques de ses applications. Ces modèles sont fondés sur le système des équations d'Euler qui décrit l'évolution de la masse volumique, de la vitesse et de l'énergie, variables principales du système. Or, ces sauts de pression sont si brutaux qu'ils entraînent la discontinuité de ces variables principales. Cela implique également la discontinuité de variables secondaires (au sens où elles sont déduites des variables principales), et en particulier de l'entropie. En vertu du second principe de la thermodynamique, cette dernière ne peut qu'augmenter, traduisant la

conversion de l'énergie cinétique en chaleur. Comme l'ont constaté von Neumann et Richtmyer de manière empirique, la croissance de l'entropie doit être restituée par le calcul pour sélectionner la solution physiquement acceptable; Lax **2** a ensuite formalisé mathématiquement cette condition. Dans le cas contraire, les simulations peuvent en effet se révéler instables ou aboutir à des résultats non physiques. En revanche, hors choc, le système des équations d'Euler prédit une évolution isentropique (à entropie constante) de l'écoulement d'un fluide compressible.

La compressibilité des régimes est caractérisée par un nombre sans dimension appelé nombre de Mach (**figure 1**), rapport entre une vitesse caractéristique de la matière et la vitesse du son dans le milieu. Il est de l'ordre du millième pour un écoulement d'eau dans une conduite et de quelques dizaines lors de la rentrée atmosphérique d'un objet spatial.

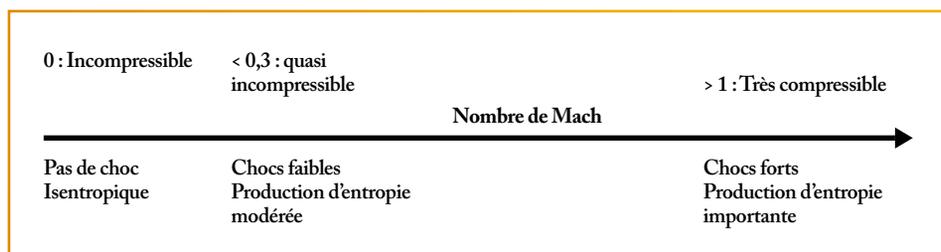


Figure 1

➔ Régimes de compressibilité en dynamique des fluides en fonction du nombre de Mach. Suivant le régime, des chocs associés à une production d'entropie peuvent survenir ou non.

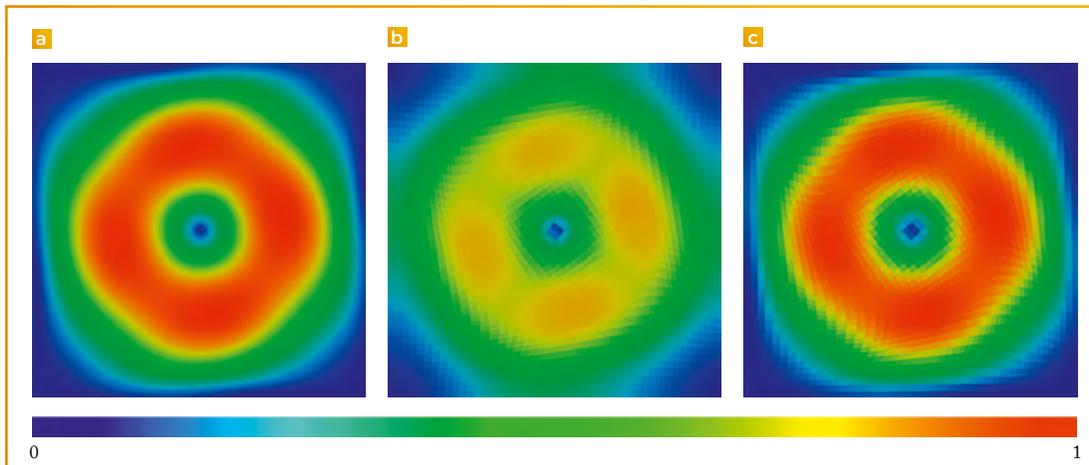


Figure 2

➤ Représentation de la norme de la vitesse d'un tourbillon de nombre de Mach égal à 0,3 (régime quasi incompressible). Le temps de la simulation correspond à 1/8 de révolution du tourbillon. L'image (a) est obtenue par un calcul très résolu avec 2,5 millions de mailles pour environ 200 heures de calcul CPU sur le supercalculateur Tera 1000 du CEA – DAM. L'image (b) est le résultat d'un calcul peu résolu avec 2500 mailles pour quelques dizaines de secondes sur un ordinateur de bureau, effectué avec la méthode standard 5 : on constate qu'après seulement 1/8 de tour, la vitesse maximale du tourbillon a diminué de 25 %, alors qu'elle devrait rester constante. En effet, pour assurer la stabilité dans des régimes très compressibles, la méthode standard convertit une grande proportion de l'énergie cinétique en chaleur, ce qui correspond à une augmentation de l'entropie. Cela entraîne une perte de précision rédhibitoire (l'énergie cinétique et donc la vitesse de rotation du tourbillon diminuent rapidement). Sur l'image (c), le calcul peu résolu, avec 2500 mailles pour quelques dizaines de secondes sur un ordinateur de bureau, mais effectué avec la nouvelle méthode 1 permet de retrouver la solution du calcul très résolu.

On considère que les effets de compressibilité peuvent être négligés en dessous d'un nombre de Mach de 0,3. Or, comme l'explique par exemple Dellacherie 3, le terme de production d'entropie, nécessaire au calcul des chocs, conduit à une erreur d'approximation proportionnelle à l'inverse du nombre de Mach. Comme le calcul des chocs est une problématique du régime compressible, les méthodes numériques dédiées à l'approximation de l'hydrodynamique incompressible n'incluent pas de mécanismes de production d'entropie de ce type, et ne souffrent pas de ce défaut. En revanche, elles sont incapables de calculer des chocs.

Des études sur les méthodes numériques en régime quasi incompressible ont été menées en référentiel eulérien 3 (référentiel du laboratoire), mais n'ont jamais été traduites en référentiel lagrangien (référentiel de la matière). Pourtant, une grande partie des stratégies d'approximation de la dynamique des gaz au CEA – DAM utilise le référentiel lagrangien. La démonstration a été faite par le CEA – DAM Île-de-France 1 du fait que les méthodes à volumes finis lagrangiennes 4,5, basées sur les idées de Godunov (et construites pour calculer des écoulements compressibles), ne peuvent pas approcher correctement les solutions des équations de la dynamique des

gaz dans les régimes peu compressibles. Une méthode qui permet de résoudre le problème a été proposée ; elle repose sur une hybridation des méthodes numériques compressibles et incompressibles. Pour être efficace, le coefficient d'hybridation doit être proportionnel au nombre de Mach. Cette nouvelle méthode numérique assure la croissance de l'entropie. De plus, le surcoût de calcul CPU est négligeable et l'erreur d'approximation de cette nouvelle méthode est uniforme (c'est-à-dire indépendante du nombre de Mach 1).

Par comparaison avec les méthodes récentes publiées, cette approche a été validée dans les régimes très compressibles et quasi incompressibles (figure 2). Pour des écoulements représentatifs de l'hydrodynamique des implosions de capsules du Laser Mégajoule, cette nouvelle méthode améliore les résultats 1.

Ce nouveau schéma permet donc d'étendre le champ d'application des méthodes numériques développées au CEA – DAM pour la dynamique des gaz à des écoulements quasi incompressibles.

RÉFÉRENCES

- 1 E. LABOURASSE, « A low-Mach correction for multi-dimensional finite volume shock capturing schemes with application in lagrangian frame », *Computers & Fluids*, **179**, p. 372-393 (2019).
- 2 P. LAX, « Shock waves and entropy », dans *Contributions to nonlinear functional analysis, proceedings of a Symposium on Nonlinear Functional Analysis*, Madison, Wisconsin, États-Unis, 12 au 14 avril 1971, Academic Press, p. 603-634 (1971).
- 3 S. DELLACHERIE, « Analysis of Godunov type schemes applied to the compressible Euler system at low Mach number », *J. Comput. Phys.*, **229**, p. 978-1016 (2010).
- 4 B. DESPRÉS, C. MAZERAN, « Lagrangian gas dynamics in 2D and lagrangian systems », *Arch. Rat. Mech. Anal.*, **178**, p. 327-372 (2005).
- 5 P.-H. MAIRE *et al.*, « A cell-centered lagrangian scheme for 2D compressible flow problems », *SIAM J. Sci. Comp.*, **29**, p. 1781-1829 (2007).

AMÉLIORATION DE LA CONVERGENCE DES MÉTHODES DE DÉCOMPOSITION DE DOMAINE POUR LA PROPAGATION D'ONDES

Les méthodes de décomposition de domaine ont trouvé un regain d'intérêt avec l'avènement des machines de calcul parallèle, car elles offrent un parallélisme intrinsèque à moindre effort. Cependant, ces méthodes appliquées aux équations des ondes, du type Helmholtz pour l'acoustique ou Maxwell pour l'électromagnétisme, souffrent souvent d'une convergence lente, réduisant leur intérêt. Une nouvelle classe de conditions de raccord entre les sous-domaines **1** permet de pallier ce problème en garantissant une convergence exponentielle de la méthode, indépendamment du maillage utilisé.

Dans le cadre des travaux pour la furtivité électromagnétique, le CEA – Cesta implémente un code de calcul parallèle mettant en œuvre une décomposition de domaine. La décomposition de domaine est une classe de méthodes numériques qui se basent sur le principe « diviser pour mieux régner » : le domaine de calcul est découpé en plusieurs sous-domaines plus petits et seuls des problèmes dits locaux (sur ces sous-domaines) sont résolus. Un processus itératif couple les solutions des problèmes locaux par l'intermédiaire de conditions de transmission (raccord), de telle sorte qu'à la convergence du processus, la solution sur le domaine global est reconstruite. Il y a deux grands avantages à ce type de méthode :

- la décomposition de domaine entraîne naturellement un parallélisme : chaque sous-domaine peut être traité indépendamment, que ce soit pour la construction du problème ou pour sa résolution. On peut donc espérer un temps de calcul réduit si la convergence est rapide, c'est-à-dire si la méthode converge en peu d'itérations ;
- seules les solutions sur les sous-domaines sont calculées explicitement : des problèmes de taille beaucoup plus grande sont alors accessibles : il suffit d'augmenter le nombre de sous-domaines.

La convergence – et donc l'efficacité des méthodes de décomposition de domaine appliquées aux phénomènes ondu-

loires – est influencée par le nombre de sous-domaines (généralement, plus le nombre de sous-domaines augmente, plus la convergence est lente) et par la manière dont les sous-domaines sont couplés aux interfaces. Un couplage classique des interfaces consiste à imposer la continuité de la solution u et de sa dérivée normale au travers de l'interface $\partial_n u$: ce sont les conditions naturelles qui garantissent que le problème décomposé est équivalent au problème global. Il existe dans la littérature de nombreuses autres conditions de transmission, toutes basées sur une combinaison de ces deux conditions naturelles, ayant des propriétés mathématiques plus ou moins intéressantes **2**. Certaines garantissent la convergence de la méthode, alors que d'autres non, et certaines sont plus performantes que d'autres.

L'ensemble des conditions de transmission de la littérature utilise une combinaison des conditions naturelles à l'aide d'opérateurs de dérivation ou d'inverses de ces opérateurs **3**. L'avantage de ces opérateurs réside dans leur simplicité d'utilisation et le faible coût de calcul qu'ils engendrent. Ces opérateurs étant locaux, ils conduisent, après discrétisation, à des matrices creuses, peu coûteuses en mémoire. Néanmoins, le CEA – Cesta a pu démontrer qu'il était impossible d'obtenir une convergence exponentielle à l'aide de tels opérateurs. Ce résultat vient de l'incompatibilité mathé-

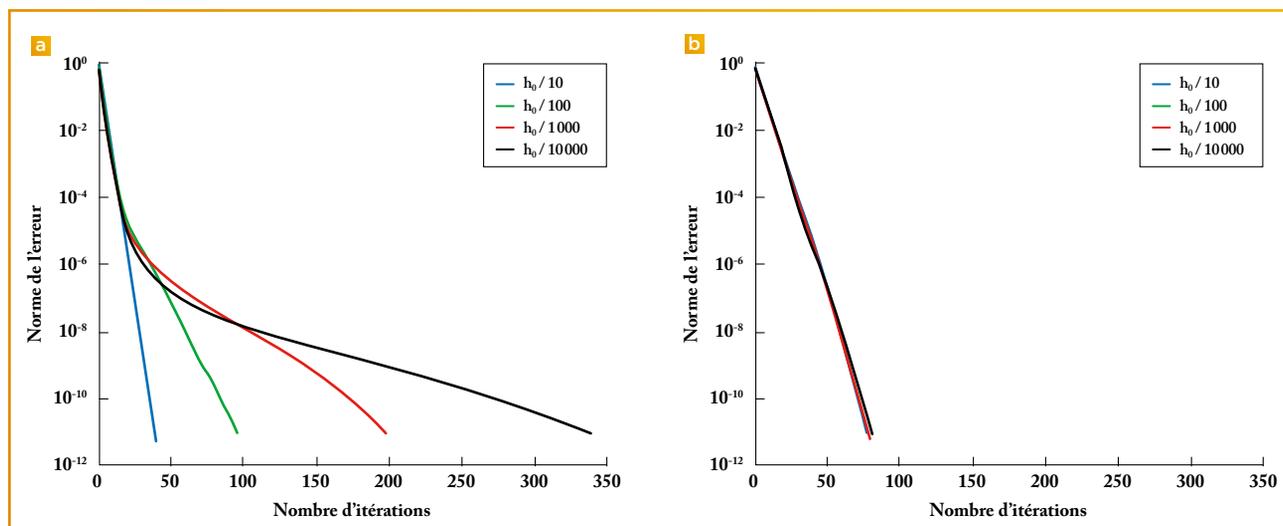


Figure 1

➔ Évolution de l'erreur au cours des itérations (a) pour des opérateurs de la littérature ou (b) pour les nouveaux opérateurs intégraux, et ce pour différents raffinements de maillage (h_0/n , $n = 10$ à 10 000). La convergence est indépendante du raffinement quand des opérateurs intégraux sont utilisés.

matique entre les différents composants de la combinaison : u et $\partial_n u$ ont des propriétés mathématiques différentes et aucun opérateur local ne permet de concilier cela. Le manque de robustesse de ces conditions de transmission est particulièrement problématique lorsque des détails géométriques forcent un raffinement du maillage : plus le maillage est fin, moins la méthode converge vite.

Pour les besoins de calcul en furtivité du CEA-DAM, il est nécessaire d'avoir une méthode à la fois robuste et performante. C'est dans cette optique que de nouvelles conditions de transmission ont été élaborées en collaboration avec le laboratoire Poems à Palaiseau **1** – dans un premier temps pour l'équation de Helmholtz. Ces conditions garantissent les propriétés mathématiques suivantes :

- le problème décomposé est équivalent au problème initial ;
- la méthode converge ;
- la méthode converge à un rythme exponentiel : à chaque itération, l'erreur est divisée par un facteur indépendant de l'itération ;
- la vitesse de convergence est indépendante du maillage.

Ces conditions de transmission permettent pour la première fois de garantir les troisième et quatrième propriétés mathématiques, ce qui apporte une robustesse à la méthode et assure une convergence rapide.

Pour obtenir ces résultats, des opérateurs intégraux singuliers, dits opérateurs pseudo-différentiels, ont été utilisés. Ces opérateurs permettent d'équilibrer les différences de propriétés mathématiques de u et de $\partial_n u$. Avec de tels opérateurs et en utilisant des outils classiques d'analyse numérique, la convergence exponentielle de la méthode a pu être démontrée. De plus, sous certaines hypothèses faibles, les démonstrations restent valables sur le problème discrétisé et la vitesse de convergence est donc indépendante du maillage (figure 1).

L'utilisation d'opérateurs intégraux conduit, après discrétisation, à des blocs de matrice denses, donc très coûteux pour la résolution des problèmes dans les sous-domaines. Cependant, il a été démontré aussi

qu'il était possible d'appliquer une troncature à l'opérateur intégral, ce qui permet de le localiser, et donc de rendre creux le bloc de matrice associé, tout en préservant les bonnes propriétés mathématiques nécessaires à la démonstration. Cette troncature réduit le coût des nouveaux opérateurs au niveau de celui des opérateurs classiques de la littérature.

Les premières simulations numériques ont montré une réduction du nombre d'itérations d'environ 50 % pour un coût par itération similaire, rendant la nouvelle méthode compétitive.

Des développements sont en cours dans le cadre d'une thèse pour étendre ces résultats aux équations de Maxwell qui gouvernent la propagation d'ondes électromagnétiques.

RÉFÉRENCES

- 1** P. JOLY, F. COLLINO, M. LECOUEZ, « Exponentially convergent non overlapping domain decomposition methods for the Helmholtz equation », *Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, **54**, p. 775-810, doi.org/10.1051/m2an/2019050 (2020).
- 2** M. J. GANDER, H. ZHANG, « A class of iterative solvers for the Helmholtz equation: factorizations, sweeping preconditioners, source transfer, single layer potentials, polarized traces, and optimized Schwarz methods », *SIAM Review*, **61**, p. 3-76, doi.org/10.1137/16M109781X (2016).
- 3** Y. BOUBENDIR, X. ANTOINE, C. GEUZAIN, « A quasi-optimal non-overlapping domain decomposition algorithm for the Helmholtz equation », *Journal of Computational Physics*, **231**, p. 262-280 (2012).

CHOCS AVANCÉES

N° 14 - Juillet 2020

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



CEA - DAM
Institut supérieur des études nucléaires
de défense (ISENDé)

Courriel : chocs@cea.fr