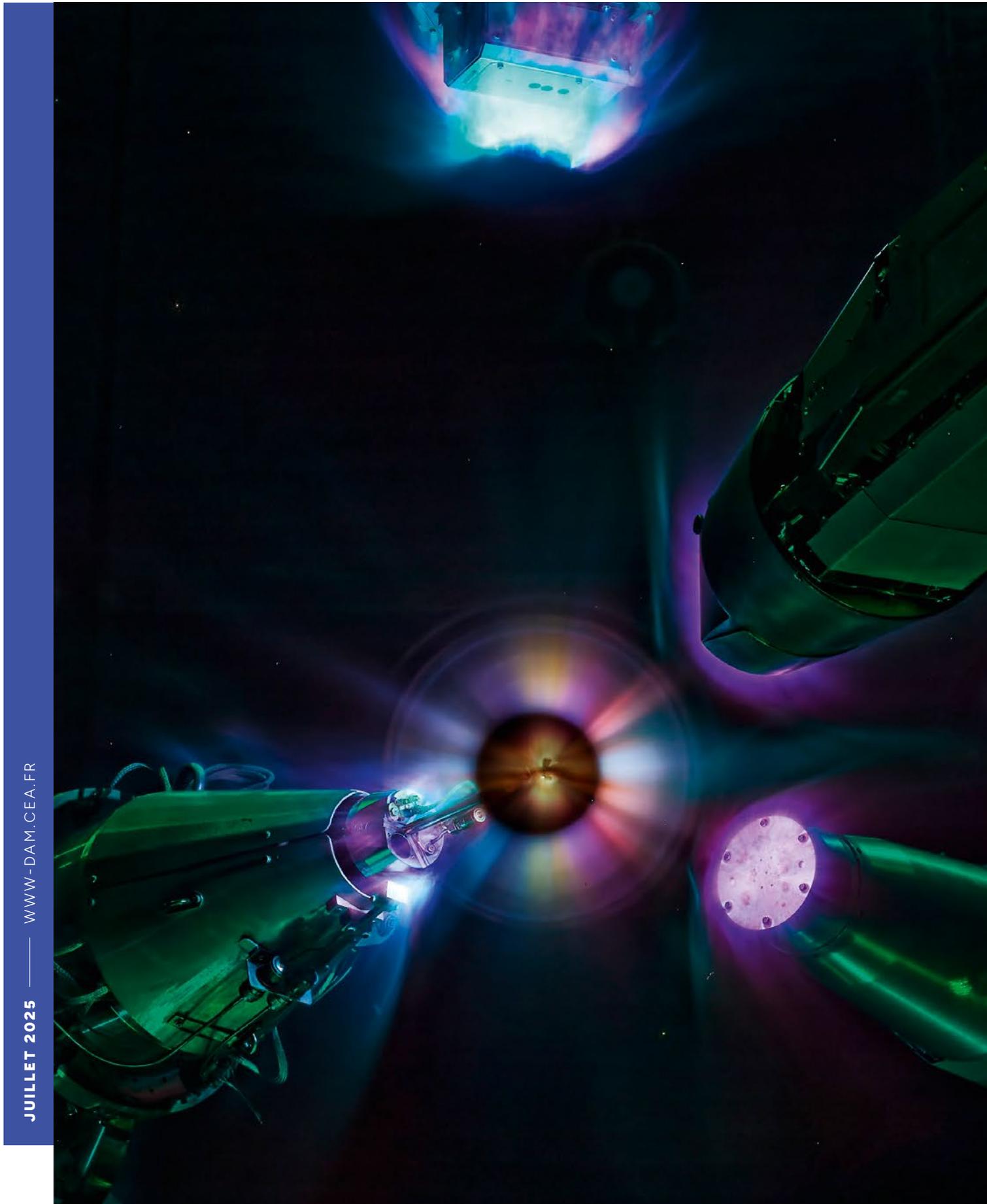


CHOCS #19 avancées



BILAN 2024 DES PUBLICATIONS ET DE LA VIE SCIENTIFIQUE DE LA DIRECTION DES APPLICATIONS MILITAIRES



JUILLET 2025 — WWW-DAM.CEA.FR



COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES

Directeur de la publication

Olivier Vacus

Coordinateur scientifique

Nathalie Blanchot

Comité scientifique

Nicolas Authier, Denis Autissier, Christelle Barthet, Philippe Belleville, Nathalie Blanchot, Daniel Bouche, Gilles Bourgès, Christopher Bowen, Danièle Cardona-Barrau, Xavier Carlotti, Patrick Carribault, Cyrille De Saint-Jean, Héléne Hébert, Jean-Christophe Joly, Pierre-Henri Maire, Jean-Luc Miquel, Éric Royer, Christophe Thiébaud, Stéphanie Thiébaud, Laurent Videau

Rédacteur en chef

Jean-Marc Laborie

Création, réalisation et impression

EFIL / www.efil.fr

Conformité

Régine Regnault

Diffusion et abonnement

Régis Vizet

PHOTO DE COUVERTURE

Photographie prise de l'intérieur de la chambre d'expériences du Laser Mégajoule lors de la focalisation des faisceaux laser dans une cavité de fusion (voir articles p. 10-11 et p. 36-37). La cavité est positionnée au centre de la chambre par un inserteur (en bas, à gauche). L'image intégrée en temps montre le plasma généré sur la cible (au centre du halo coloré) pendant l'interaction qui ne dure que quelques milliardièmes de seconde. Les différentes couleurs du halo sont caractéristiques des matériaux de la cible. Les rayonnements X émis par la cible illuminent les diagnostics de l'expérience (en haut et à droite) et créent un plasma qui rayonne une lumière bleu-violet.
© CEA-DAM – Éric Journot



Consulter la
version digitale sur
www-dam.cea.fr

AVANCÉES

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

Email: chocs@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

02 ÉDITORIAL

04 VIE SCIENTIFIQUE



INTERACTION RAYONNEMENT-MATIÈRE, PHYSIQUE DES PLASMAS

P. 10 — Laser Mégajoule : succès de la première expérience de fusion

S. Liberatore, P. Gauthier, J.-L. Willien, O. Landoas, B. Villette, P.-É. Masson-Laborde, F. Philippe, O. Poujade, R. Botrel, O. Henry

P. 12 — Des pulsations du Soleil à son opacité

P. Cossé, J.-C. Pain

P. 14 — Des ions catapultés dans un gaz par un laser ultra-intense et ultrabref

L. Gremillet, V. Ospina-Bohórquez, J. J. Santos



PHYSIQUE NUCLÉAIRE

P. 16 — Des fragments de fission froide à la forme inattendue

L. Gaudefroy, A. Francheteau

P. 18 — Percée majeure dans la description théorique de la fission nucléaire

N. Pillet, P. Carpentier, N. Dubray, D. Regnier, D. Lacroix

P. 20 — Une surprise de taille dans la forme des noyaux du fermium

S. Péru, S. Hilaire



PHYSIQUE DE LA MATIÈRE CONDENSÉE

P. 22 — Comprimer rapidement l'eau liquide retarde sa cristallisation

C. Pépin, R. André, F. Occelli, F. Dembele, P. Loubeyre, A. Mozzanica, V. Hinger, M. Levantino

P. 24 — Effets spectaculaires de température dans le plutonium

F. Bottin, R. Béjaud, B. Amadon, L. Baguet, M. Torrent, A. Castellano, J. Bouchet

P. 26 — Exploration de l'intérieur de Saturne avec des simulations atomiques

F. Soubiran, M. Preising, M. French, R. Redmer, C. Mankovich



MATÉRIAUX, PHYSIQUE DU SOLIDE

P. 28 — Impression 3D de ferrites pour l'électronique de puissance

A.-L. Adenot-Engelvin, A. Zekhnini, G. Delette, O. Isnard

P. 30 — Quel matériau pour protéger les engins spatiaux lors de la rentrée atmosphérique ?

A. Saintonge, Y. Le Petitcorps, J. Braun, S. Beaudet-Savignat, T. Piquero, A. Allemand



MÉCANIQUE ET THERMIQUE

P. 32 — Un générateur de chocs compact pour caractériser les explosifs

P. Hébert, S. Riboulet, E. Bouton, J. Morand, A. Sollier

P. 34 — Mieux comprendre la formation d'un nuage de particules sous choc grâce à la lumière

J. A. Don Jayamanne, R. Outerovitch, F. Ballanger, J. Bénier, E. Blanco, J. Tailleur, A. Hervouët, P. Gandeboeuf, J.-R. Burie, O. Durand, C. Chauvin, P. Hereil, R. Pierrat, R. Carminati

P. 36 — Laser Mégajoule : tout est prêt pour étudier l'effet mécanique du choc laser sur le porte-cible

C. Le Bras, E. Lescouste, J.-M. Chevalier, G. Boutoux, D. Hébert

P. 38 — Vers des essais mécaniques multidirectionnels

A. Banvillet, M. Aimé

P. 40 — Transition à la turbulence en régime hypersonique : comment modéliser les pointes avant des véhicules spatiaux ?

C. Caillaud, E. Martini, G. Lehnasch, P. Jordan, O. Schmidt

P. 42 — Au cœur des boules de feu, même les métaux brûlent

A. Gosset, J. Suarez, S. Courtaud, L. Selle



OPTIQUE ET OPTRONIQUE

P. 44 — Laser Mégajoule : une méthode pour simuler la propagation des faisceaux

H. Coïc, Y. Abdelmoumni-Prunes, C. Rouyer

P. 46 — Laser Mégajoule : vers des faisceaux plus performants

A. Fusaro, D. Penninckx, R. Collin, G. Riazuelo, P. Loiseau, O. Thauvin



SCIENCE DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT

P. 48 — Séisme ou explosion nucléaire : la réponse ne se fait plus attendre

A. Trilla, Y. Cano



CHIMIE

P. 50 — Tamiser un gaz radioactif pour séparer ses composants

I. Bezverkhyy, V. Boyer, J.-P. Bellat, C. Cabaud

Édito

La science comme boussole

Au début du xx^e siècle, en 1915 exactement, Alfred Wegener publiait un livre intitulé *La Genèse des continents et des océans*. Il y défendait notamment une théorie qui sera contestée pendant plusieurs décennies, avant de s'imposer et d'être popularisée sous le nom de « dérive des continents ». Un siècle plus tard, au-delà de l'hommage que mérite ce brillant scientifique allemand, on est en droit de se demander si ses travaux en géophysique ne devraient pas être complétés par un volet géopolitique car, en plus des déplacements horizontaux des continents les uns par rapport aux autres, la proximité – ou la distance – des idées qui s'y développent et des valeurs qui s'y imposent ne cesse d'évoluer.

En ce début d'année 2025, le lent éloignement des États-Unis de la « vieille Europe » vient de s'accélérer significativement. À peine en place, la nouvelle administration fédérale a décidé de gérer les grands programmes de recherche en mêlant une sorte d'optimisation technico-économique à des directives d'ordre idéologique, au détriment des approches scientifiques jusqu'alors privilégiées. Ce virage radical s'accompagne d'une préférence nationale revendiquée qui inquiète tous les chercheurs, états-unis ou non. Le niveau d'implication au sein de l'Otan est interrogé.

Dans le même temps, à l'Est, la faille qui s'est ouverte entre l'Europe et la Russie est aujourd'hui infranchissable. Elle n'empêche pas – au contraire – un autre pays-continent, la Chine, de poursuivre sa route vers le statut de première puissance économique mondiale. Rappelons que la priorité du pouvoir demeure, comme cela a été répété lors du Congrès national du Parti communiste de mars 2025, de gagner la compétition technologique mondiale. Il s'en est donné les moyens à travers une planification pluriannuelle, une veille active et un socle de compétences qui profite d'une ouverture internationale et d'une stratégie de formation ambitieuse. On constate ainsi que, depuis 2020, le nombre d'articles scientifiques publiés par la Chine dépasse celui des États-Unis.

Face à ces bouleversements, tous les acteurs européens du monde de la recherche et de celui de la défense se doivent de tenir leur rang, et il se trouve que la Direction des applications militaires du CEA est à la croisée de ces deux mondes. Or, pour ce qui concerne la recherche et les développements technologiques, l'urgence n'est pas tant de réagir que de défendre les grands principes sur lesquels se fondent nos études et nos programmes : des démarches scientifiques rigoureuses et suivies sur le long terme.

Cette démarche commence par une modélisation des phénomènes physiques d'intérêt au meilleur niveau, puis associe étroitement calculs et mesures. Les calculs permettent d'évaluer les performances des objets conçus par la DAM, à commencer par les têtes nucléaires des composantes océanique et aéroportée de la dissuasion française ; les mêmes outils permettent aussi de concevoir des expériences. La réalisation de ces expériences, puis l'exploitation des mesures jouent alors un rôle déterminant. Tantôt elles valident les modélisations physiques choisies et les chaînes de calcul qui en découlent, tantôt elles mettent en évidence les limites d'un modèle ou d'un calcul et appellent une correction, un complément ou une nouvelle calibration. Toujours, par une confrontation directe, elles garantissent la maîtrise des incertitudes de calcul et de mesure.

Avant de donner quelques exemples de succès récents remportés par la DAM, je voudrais profiter de cet éditorial pour rappeler qu'ils sont le fruit d'un travail collectif. Concevoir une tête nucléaire ou garantir ses multiples performances, gérer le stock de matières stratégiques de la France, accompagner pendant des décennies les maîtres d'œuvre des chaufferies nucléaires

de la Marine nationale, autant de missions qui ne s'improvisent pas, et surtout qui ne s'envisagent qu'en équipe. Heureusement, car l'évolution constante des besoins de ces programmes amène sans cesse les équipes de la DAM à relever de nouveaux défis scientifiques et technologiques, à la pointe des savoirs et des savoir-faire.

Le programme Simulation, lancé en 1996 pour permettre à la France de garantir ses armes nucléaires sans nouveaux essais, suffira à illustrer mon propos. Il est la mise en œuvre concrète de la démarche scientifique, pour répondre aux besoins futurs de la dissuasion.



Le directeur scientifique du CEA - DAM et les assistants scientifiques des directeurs de centre.

Pour ce qui est du calcul, le supercalculateur Exa 1 a récemment été complété par une partition dite à haute efficacité. Elle combine processeurs classiques (CPU pour *Computer Processing Unit*) et processeurs graphiques (GPU, pour *Graphics Processing Unit*), et est entrée à la dix-septième place au classement mondial Top 500. Il est l'outil indispensable d'exploration par le calcul de pans entiers de la physique parfois inaccessibles à l'expérience, outil réservé à la DAM et à l'exécution de ses programmes. Pour les études scientifiques, les chercheurs de la DAM et l'ensemble de la communauté académique exploitent les capacités du Très Grand Centre de calcul (TGCC), situé sur le site du CEA-DAM Île-de-France, qui a été choisi en juin 2024 pour accueillir le deuxième calculateur exaflopique européen, baptisé Alice Recoque.

Pour ce qui concerne le volet expérimental du programme Simulation, ce sont ses deux principales installations qui sont en passe d'être achevées. Avec l'installation Epure, la France et le Royaume-Uni disposent depuis 2015 d'une installation radiographique permettant de réaliser des expériences hydrodynamiques pleinement représentatives du fonctionnement d'une arme nucléaire. Fin 2025, cette installation disposera d'une capacité multiaxe, en exploitant simultanément trois machines permettant l'observation des édifices expérimentaux dans autant de directions. Il en résultera une caractérisation plus fine du comportement de la matière, étape nécessaire pour relever les défis de l'optimisation des futures têtes nucléaires. Dans le même temps, l'installation Laser Mégajoule sera complétée puis qualifiée pour être pleinement opérationnelle en 2027. Déjà sans équivalent en Europe, elle permettra à terme à la France de réaliser des expériences de physique extrême mettant en jeu simultanément 176 faisceaux laser intenses, pour atteindre une énergie supérieure au mégajoule. Comme toujours, ce moyen sera ouvert à hauteur de 25 % à la communauté internationale des hautes densités d'énergie et de l'interaction laser-plasma.

Ces exemples ne sont pas des exceptions, ils sont au contraire emblématiques. Ce haut niveau d'exigence, cette ambition se retrouvent au cœur des nombreuses études scientifiques et techniques confiées aux équipes de la DAM, et dont certaines seront évoquées à travers les articles de ce numéro de *chocs Avancées*. Je vous en souhaite une bonne lecture.

Olivier Vacus

Directeur scientifique du CEA - DAM

Vie scientifique

→ PRIX ET DISTINCTIONS EN 2024

Nomination à l'Editorial Board du *Journal of Physics B*

Après deux années d'exercice en tant qu'Associate Editor, **Jean-Christophe PAIN**, du centre DAM Île-de-France, a été nommé membre de l'Executive Editorial Board du *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. Cette revue scientifique internationale à comité de lecture est publiée par l'Institute of Physics Publishing (IOP).

Prix de thèse du ministère des Armées

Laurine CUROS est la lauréate du prix de thèse du ministère des Armées pour ses travaux sur la modélisation comportementale des effets de destruction d'alimentations d'équipements électroniques soumises à des impulsions électriques conduites à fort niveau. Cette thèse était menée à Gramat en collaboration avec

le laboratoire Intégration du matériau au système (IMS) de l'université de Bordeaux.

Prix de la meilleure communication orale

Prix de la troisième meilleure communication orale au congrès New Trends in Research of Energetic Materials à Pardubice obtenu par **Julie MORAND**, doctorante au centre du Ripault. Sa communication présente une approche originale et souple pour générer et caractériser les chocs nécessaires à l'évaluation de la sensibilité des explosifs en vue de leur intégration dans un détonateur.

Prix du public à « 3 minute thesis »

La première finale de la compétition « 3 minute thesis » a décerné le prix du public à **Fanny LEHMANN**, du centre DAM Île-de-France. Ce concours consiste

à présenter sa thèse en trois minutes à des non-spécialistes. Avec sa présentation, Fanny LEHMANN a illustré les bénéfices des opérateurs de neurones pour l'aléa sismique dans le cadre de la sûreté des installations nucléaires.

Prix du meilleur article étudiant

Nicolas CASTAGNET, du centre de Gramat, a remporté au Japon le prix du meilleur article étudiant de la conférence Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. L'article propose une approche permettant de rechercher l'origine des défaillances des circuits électroniques soumis à des perturbations électromagnétiques intentionnelles. Ces travaux contribuent à développer une nouvelle méthodologie pour l'analyse et la compréhension des phénomènes induits sur l'électronique des cibles pouvant être illuminées par une arme à énergie dirigée de type électromagnétique.

→ COLLOQUES ORGANISÉS EN 2024

Co-chair meeting NNSA-CEA-DAM

Le co-chair meeting NNSA-CEA-DAM a réuni des représentants de la NNSA (National Nuclear Security Administration), du LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) et de la DAM pour examiner les collaborations en cours et envisager de nouvelles possibilités dans le domaine des lasers, des cibles et des diagnostics plasmas. Cette rencontre formelle, qui s'est tenue au LLNL, a été précédée de deux journées d'échanges techniques fructueuses entre les acteurs techniques des deux organisations. Les participants ont également eu l'occasion de visiter l'installation laser NIF (National Ignition Facility) et plusieurs laboratoires, tels que ceux consacrés à la remédiation des optiques, à la cryogénie et à la fabrication de cibles. Les représentants de la NNSA et du LLNL ont manifesté un vif intérêt pour cette collaboration et ont proposé d'étendre son champ d'application à d'autres domaines présentant un intérêt commun.

General Meeting Basic Science

Le centre de Valduc a reçu une délégation américaine emmenée par S. Nelson, (Assistant Deputy Administrator for Office of Experimental Sciences, Co-Chair of Agreement, NNSA) et les acteurs de l'accord DAM-NNSA « Basic Science » (Mike Kreisler et les représentants de LLNL, LANL et SNL). Ces deux journées de présentations ont

débuté par le mot d'accueil de la directrice du centre, un exposé des avancées des études scientifiques et techniques de base à la NNSA par S. Nelson, et celles obtenues à la DAM par le directeur scientifique O. Vacus; M. Kreisler rappelant l'histoire de cet accord fructueux et toujours très actif. Les présentations, centrées notamment sur les thématiques de la physique des plasmas et la physique nucléaire, ont été porteuses d'échanges et enrichies par la visite des laboratoires de fabrication et de caractérisation du service microcibles pour les participants, tandis que le directeur scientifique accompagnait S. Nelson et son adjoint pour une visite de l'installation radiographique Epure.

14^e édition du workshop Ilow

La 14^e édition du workshop Ilow (International Laser Operation Workshop) dédié à l'exploitation des lasers de puissance s'est tenue dans le centre du Cesta. Cet événement a réuni près de 100 participants dont 80 venus du LLNL-NIF, de l'université de Rochester (LE), d'Aldermaston (AWE), des installations ELI-ALPS, ELI-NP, ELI-Beams, du LULI, du SLAC de Stanford, du STFC (Rutherford) et de la Sandia. Les participants ont assisté à la présentation de l'avancement de chaque installation et des tables rondes ont été animées autour de thèmes liés à l'exploitation de ces installations. À cette occasion, le Cesta a organisé des visites de laboratoires et des démon-

trations *in situ*, permettant aux participants d'échanger sur leurs expériences.

Conférence Fluid & Elasticity

La conférence Fluid & Elasticity s'est déroulée à Arcachon. Ce colloque a rassemblé 70 chercheurs travaillant sur des problèmes fondamentaux de couplage entre fluide en mouvement et corps déformable. Ces scientifiques issus des institutions les plus prestigieuses (Harvard, Princeton, Cambridge, École polytechnique, École polytechnique fédérale de Lausanne) ont présenté des travaux de très haut niveau. Le centre du Cesta a organisé cette cinquième édition qui a permis un échange de points de vue et une consolidation des collaborations internationales.

Fourth Workshop C3PO'24 for HPC

Le support des compilateurs pour des environnements de programmation, des méthodologies d'analyses ou des chaînes d'outils est essentiel à l'ère de l'exascale pour la robustesse et la portabilité des codes. Organisé à Hambourg, ce workshop a réuni des scientifiques concernés par l'application des méthodologies de compilation et de traduction source à source afin d'améliorer la programmation parallèle et les modèles de programmation associés (MPI, OpenMP, modèles hybrides et hétérogènes). Le centre DAM Île-de-France a été impliqué dans le comité d'organisation et le comité de programme.

International Meshing Roundtable

La conférence International Meshing Roundtable est la référence internationale pour les activités de maillage en simulation numérique. L'édition IMR'24 s'est tenue à Baltimore, avec Frank LEDOUX, du centre DAM Île-de-France, membre du comité d'organisation.

Colloque scientifique du groupe hyperspectral

Le centre DAM Île-de-France a participé à l'organisation du colloque du groupe hyperspectral de la Société française de photogrammétrie et télédétection à Rennes. Ce colloque (environ 80 participants) a abordé différents domaines (capteurs, algorithmes de traitement des données) intéressant les activités de surveillance et non-prolifération à la DAM. Ont été aussi présentées les missions spatiales et plusieurs applications (géosciences, végétation, atmosphère, industrie, etc.).

Conseil scientifique du 6^e colloque MDIS

Le centre DAM Île-de-France a participé au comité scientifique du colloque MDIS (Mesure de la déformation par imagerie satellite), organisé par le BRGM, le Cnes et le CNRS à Orléans, dans le cadre de l'infrastructure de recherche Data Terra. Ce colloque aborde les approches utilisant les images spatiales pour les applications en sciences de la Terre et déformations du sol. Une session de formation y est également organisée sur les méthodes de traitement de données.

Conférence Radiative Properties of Hot Dense Matter

Le centre DAM Île-de-France a coorganisé avec l'université Paris-Saclay la conférence Radiative Properties of Hot Dense Matter à Paris, qui a rassemblé une centaine de chercheurs.

Journées hautes puissances pulsées

La première édition des Journées hautes puissances pulsées (HPP) s'est déroulée à Gramat avec 160 participants, dont des partenaires institutionnels, académiques et industriels qui ont pu échanger sur les enjeux et les technologies des hautes puissances pulsées, ainsi que sur les applications relevant des domaines militaires, industriels ou encore thérapeutiques.

Workshop de lancement du projet Taranis

Lancé à l'initiative de la société Thales dans le cadre de l'appel à projets France 2030 sur les réacteurs innovants, le projet Taranis vise à concevoir et à industrialiser un concept d'installation de production d'énergie basé sur la fusion par confinement inertiel laser. Ce projet, dont la première phase est d'aboutir en trois ans à un avant-projet crédible, implique le CEA (DAM et DRF) ainsi que les unités mixtes de recherche Luli et Celia. La première réunion de travail, regroupant l'ensemble des acteurs du projet, s'est tenue à l'Institut lasers et plasmas (ILP). Elle a permis d'échanger en profondeur sur les points clés du projet tels que

la gouvernance et l'organisation, les défis laser, la définition du point de fonctionnement du réacteur et les jalons simulation-expériences de la phase 1.

Journées nationales des spectroscopies de photoémission

Les Journées nationales ont rassemblé à Lille plus de 100 participants, chercheurs, ingénieurs, techniciens et doctorants en chimie, physique et science des matériaux, et ont rencontré un véritable succès. Elles ont pour objectif de présenter les dernières évolutions des spectroscopies de photoémission pour la compréhension des phénomènes liés à la physique et à la chimie des surfaces et interfaces et pour l'aspect analytique au sens large de ces techniques. Trois directions du CEA (DRT, DRF, DAM) sont impliquées dans le comité d'organisation et scientifique ; la DAM était représentée par Lionel JOLLY, du centre de Valduc. Cette visibilité participe au rayonnement scientifique du CEA.

Séminaire Hera

La deuxième édition du séminaire Hera, dédié à l'étude des écoulements hypersoniques raréfiés et coorganisé par le laboratoire Icare du CNRS, le centre Onera de Toulouse, le centre du Cesta et l'association HyFAR-ARA, s'est déroulée à Orléans. Cette manifestation a rassemblé une quarantaine de scientifiques issus du monde industriel et du monde académique. Les participants ont pu partager le meilleur de l'état de l'art en matière de modélisation physique, de simulation numérique et d'expérimentation dans le domaine des écoulements hypersoniques raréfiés.

Première conférence Chimie et Impression nD

Le centre du Ripault a organisé les premières Journées Chimie et Impression nD à Tours. Cette première manifestation avait pour objectif de fédérer les spécialistes académiques et industriels travaillant sur le couplage entre chimie et procédés de fabrication additive 2D, 3D et 4D. Le programme des exposés, particulièrement apprécié, a permis de réunir plus de 35 experts des matériaux et des procédés venus de toute la France. Relayé par France Additive et la SF2M, cet événement à l'initiative du CEA s'est conclu par la perspective de créer une communauté scientifique nationale (GDR) sur le thème de l'impression nD de matériaux et de systèmes architecturés.

Journées de la Cetama

Le centre du Ripault a accueilli les réunions plénières de la Cetama (Commission d'établissement des méthodes d'analyse) du groupe de travail sur les analyses par spectrométrie optique et le dosage des éléments légers et du groupe de travail sur la spectrométrie de masse. Cette manifestation a regroupé une quarantaine de personnes venant d'horizons variés : centres CEA de Marcoule, de Valduc, de Saclay, IRSN, EDF, Framatome, etc. Les échanges et les différents exposés sur les méthodes d'analyses chimiques par spectrométrie ont permis de faire le point sur les avancées techniques et les développements en cours et une mise en commun des problématiques rencontrées.

La DAM organise sa journée consacrée à l'IA

Les pilotes de la communauté de savoir IA ont organisé la journée « IA à la DAM ». Cette journée d'acculturation, consacrée au retour d'expérience et au partage des bonnes pratiques, a réuni une soixantaine de personnes de tous les centres, avec des exposés assurés par des salariés des centres DAM Île-de-France et du Cesta. Satisfaction générale, en particulier car ce rendez-vous permet aux acteurs les plus avancés de répondre aux questions de ceux qui débutent ou manifestent simplement un intérêt.

Journées nationales des doctorants de la DAM

Après des années au cours desquelles les journées des doctorants étaient organisées localement dans les centres, les premières Journées nationales des doctorants de la DAM ont eu lieu à Arpajon avec 280 personnes, dont 145 doctorants. L'objectif de ce rendez-vous unique est de donner une meilleure connaissance de l'ensemble de la DAM à la fois à nos doctorants et à nos partenaires académiques ou institutionnels.

4^e journées utilisateurs Abaqus de la DAM

La 4^e édition des journées utilisateurs Abaqus s'est tenue les 29 et 30 novembre 2023, à Tours puis dans le centre du Ripault. Abaqus est un code de calcul utilisé pour des simulations numériques en mécanique des solides et des structures, en thermique et en thermomécanique. L'objectif de cette manifestation, qui a rassemblé 70 personnes issues de l'ensemble des centres de la DAM, était de favoriser les échanges sur les pratiques entre les utilisateurs.

LIVRES PARUS EN 2024

Analyse quantitative des schémas numériques pour les équations aux dérivées partielles

Daniel Bouche, William Weens
(CEA – DAM)

EDP Sciences mars 2024,
ISBN 978-2-7598-2760-2.

L'analyse quantitative des schémas numériques vise à comprendre leur comportement. Pour y parvenir, elle calcule explicitement des solutions de schémas et les compare aux solutions exactes des équations aux dérivées partielles. Elle s'appuie principalement sur trois méthodes, que nous présentons dans ce livre.

Emerging analytical techniques for chemical speciation studies

Chapitre 3 par Jean AUPIAIS
(CEA – DAM) : « Metal-ligand speciation using electromigration techniques »

Michel Meyer & Demetrio Milea Eds.,
World Publishing, Singapore, 2024,
ISSN 2529-7716.

Mesure du déplacement de surface à partir d'images de télédétection

Traduction en français du chapitre 1
par Béatrice PINEL-PUYSSÉGUR
(CEA – DAM)

ISTE Books, 464 pages, 2024, ISBN
9781789480832.



FAITS MARQUANTS 2024

Projection thermique de céramiques sur objet 3D

Un revêtement ultraréfractaire UHTC (*Ultra High Temperature Ceramics*) a été déposé sur une gouverne de vol Vmax2 de géométrie complexe, par une méthode particulièrement novatrice. Les équipes du centre du Ripault ont mis à profit les dernières avancées en fabrication robotisée pour déposer cette couche sur un objet à la géométrie fortement 3D. L'avancée majeure réside dans le couplage entre la trajectoire obtenue par conception et fabrication assistée par ordinateur (CFAO) et la simulation numérique prédictive de l'épaisseur déposée. Ce couplage a permis la réalisation de premières itérations de dépôts sur des pièces prototypes 100 % numériques, avec des résultats extrêmement prometteurs pour les développements futurs en matière d'homogénéité d'épaisseur. Les gains attendus par cette nouvelle méthodologie sont la réduction du temps d'industrialisation en projection robotisée et la capacité à réaliser ces dépôts sur des maquettes complexes.

Le procédé HANETEC™ présenté au CES à Las Vegas

HANETEC™ est un procédé révolutionnaire qui permet de synthétiser des nanomatériaux inédits ouvrant de nouvelles perspectives d'innovation dans des domaines très variés tels que les batteries, les piles à combustible, la catalyse, les capteurs, la médecine ou encore la production et le stockage de l'hydrogène. Le procédé HANETEC™ permet de convertir en quelques secondes des milliers d'éclairs en autant de nanofilaments métalliques pour former des métaux sous forme d'éponge nanostructurée et ultralégère. Bénéficiant de plus de dix années de recherche et de développement menées par deux ingénieurs du centre de Valduc, le procédé HANETEC™ permet aujourd'hui de maîtriser les caractéristiques de ces éponges métalliques en matière de nanostructure, de densité et de porosité quel que soit le métal d'intérêt, qu'il soit pur (cuivre, zinc, or, argent, platine, palladium...) ou sous forme d'alliage tel que les alliages à haute entropie (HEA). Les inventeurs ont présenté leur découverte au plus

grand salon mondial de la technologie (le CES pour Consumer Electronics Show) en janvier 2024 à Las Vegas.

Le centre du Ripault, contributeur au travers du LCTS au livre blanc sur les composites à matrice céramique

Depuis plus de trente ans, les recherches effectuées dans le Laboratoire des composites thermostrostructuraux (LCTS), géré conjointement par le CEA, le CNRS et Safran Ceramics, ont permis d'aboutir à de nombreux résultats appliqués de manière concrète dans le monde industriel pour Safran Ceramics et au profit de la défense pour la DAM. À l'occasion du comité de direction du 17 mai 2024, le rôle central joué par le LCTS pour la parution du livre blanc sur les composites à matrice céramique a été souligné. Ce livre blanc auquel ont participé la majorité des acteurs du domaine est disponible en ligne et permet de mieux situer les enjeux et la nécessité pour la France de rester un des leaders dans le domaine.



NOUVEAUX ACCORDS DE PARTENARIAT EN 2024

Chaire d'enseignement et de recherche « Physique des hautes densités d'énergie et fusion inertielle »

Lancé il y a plus de cinq ans, ce partenariat a été officiellement lancé le 4 décembre 2023 par le directeur des applications militaires et la directrice générale de l'École polytechnique. Cette chaire propose aux étudiants de troisième année du cursus ingénieur un nouvel enseignement d'introduction à la physique des hautes densités d'énergie. Cette chaire permettra *in fine* de renforcer la communauté académique dans ce domaine stratégique pour la DAM.

par ses étudiants en lien avec des partenaires industriels et institutionnels. La DAM devient partenaire du NAASC et soutient la chaire Espace. Ces deux initiatives sont un gage d'attractivité pour attirer et former des étudiants sur des compétences cruciales.

Adhésion au NAASC et soutien à la chaire Espace de la Fondation université de Bordeaux

La Région Nouvelle-Aquitaine bénéficie d'un écosystème aérospatial et défense florissant. Deux initiatives récentes contribuent à la dynamique de cette filière d'intérêt pour le CEA - DAM. D'une part, les cinq établissements Arts et Métiers Bordeaux, Estia, Isae-Ensm, Sciences-Po Bordeaux et l'Enseirb-Matmeca se sont associés au sein du groupement d'intérêt scientifique Naasc (Nouvelle-Aquitaine Academic Space Center). Ce GIS vise à favoriser l'innovation dans le domaine de l'accès à l'espace (lanceur et charge utile). D'autre part, l'Enseirb-Matmeca met en place la chaire « Espace et nouvelles technologies » dans le cadre de la Fondation université de Bordeaux, avec l'objectif de proposer des projets collaboratifs ambitieux développés

Renouvellement de la convention Parcours Industrie Mines Nancy

Depuis 2019, le centre de Valduc collabore avec les Mines de Nancy autour du développement d'un dispositif de surveillance mobile et autonome capable de détecter des écarts au fonctionnement nominal d'une installation nucléaire. Cette collaboration repose sur la mise en œuvre de projets pédagogiques par des groupes d'élèves encadrés par un enseignant et orientés par les besoins du CEA. La confirmation du besoin du CEA et les perspectives de développement ont poussé le CEA - DAM à poursuivre cette collaboration et même l'ouvrir à des installations banales.

Renouvellement de la convention avec SupMicrotech de Besançon

Le centre de Valduc s'est engagé dans un partenariat avec plusieurs écoles d'ingénieurs, dont SupMicrotech Besançon. La convention passée vise à renforcer les liens avec l'école, faire connaître aux étudiants et au corps enseignant les opportunités de stages, alternances, thèses et recrutements.

Reconduction du LRC Electra

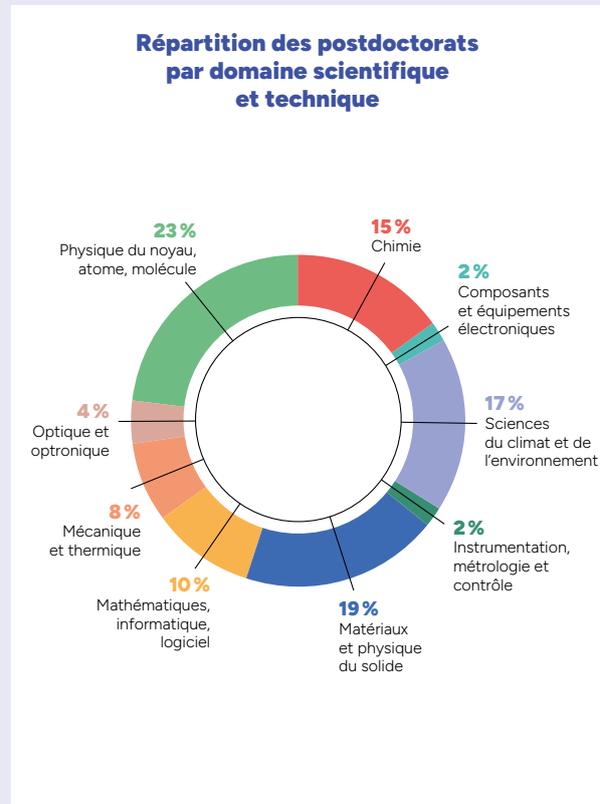
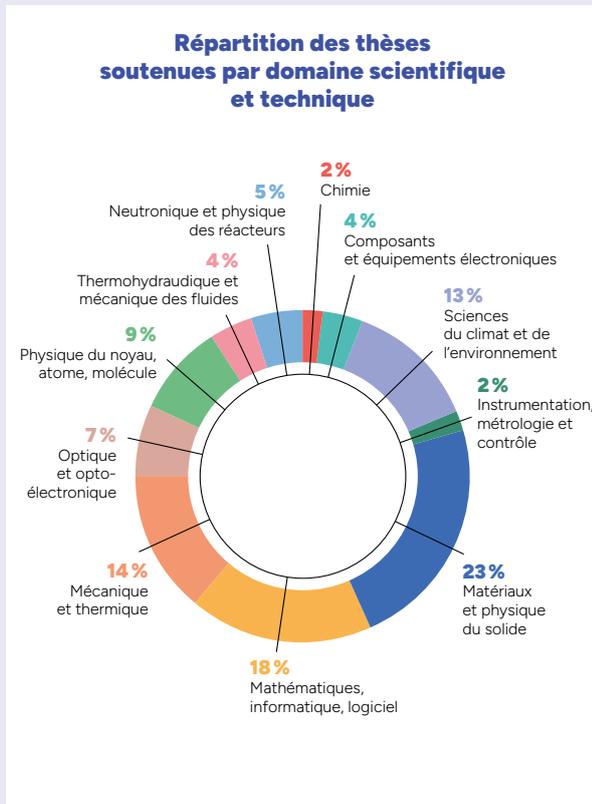
Un nouvel accord de laboratoire de recherche conventionné a été signé en fin d'année avec l'Institut de recherche sur les céramiques de Limoges. Plusieurs thématiques d'intérêt pour le centre du Ripault y sont reconduites, que ce soit sur le design de céramiques diélectriques conformées, les matériaux précéramiques ou la modélisation des effets du frittage des céramiques élaborées par fabrication additive. De nouveaux thèmes de collaboration ont été ajoutés sur les matériaux d'amplification laser pour le Laser Mégajoule et sur des céramiques mises en œuvre en milieu de sels fondus.

Effet de viscosité sur l'instabilité de Rayleigh-Taylor

Lors d'expériences de fusion par confinement inertiel, le deutérium-tritium, source d'énergie thermonucléaire, est comprimé au sein d'un microballon composé d'un matériau plus lourd. Une zone de mélange se forme alors par des instabilités hydrodynamiques comme celle de Rayleigh-Taylor. Suite à l'augmentation de température et de densité, chaque fluide peut voir sa viscosité (résistance au cisaillement) évoluer fortement, au point de perturber la croissance de mélange et d'influer sur les réactions de fusion. L'objectif de la collaboration entre le centre DAM Île-de-France et l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse est de comprendre ces effets, *via* des expériences élémentaires et des simulations numériques, afin de valider et améliorer des modèles récemment développés à la DAM.

→ THÈSES SOUTENUES ET EN PRÉPARATION – POSTDOCTORATS

En 2024, 188 doctorants préparaient une thèse au CEA - DAM, dans un laboratoire d'un des cinq centres, ou dans un laboratoire partenaire avec le soutien financier du CEA - DAM; 56 l'ont soutenue au cours de l'année. Par ailleurs, 52 docteurs étaient en contrat postdoctoral (voir aux pages suivantes les listes des thèses soutenues et des postdoctorats).



→ PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

En 2024, le CEA - DAM a publié 356 articles et comptes rendus de conférence dans des journaux à comité de lecture, ainsi que 50 comptes rendus de conférence dans un livre ou dans une série (ISI-Web of Science, 02/06/2025).

→ HABILITATIONS À DIRIGER LES RECHERCHES (HDR)

Jean-Christophe DIOT

Centre de Gramat

Université de Pau et des pays de l'Adour

Spécialité : électromagnétisme, génie électrique.

Béatrice PINEL-PUYSSÉGUR

Centre DAM Île-de-France

Université Paris-Saclay

Spécialité : traitement d'images.

Robin PIRON

Centre DAM Île-de-France

Sorbonne Université

Spécialité : physique des plasmas.

Marc TORRENT

Centre DAM Île-de-France

Université Paris-Saclay

Spécialité : modélisation numérique.

Roland DUCLOUS

Centre DAM Île-de-France

Université Paris-Cité

Spécialité : mathématiques appliquées.

CHIMIE

Florian FEYNES, Vieillesse thermique d'un joint silicone réticulé à température ambiante: rôle du confinement, université de Poitiers.

COMPOSANTS ET ÉQUIPEMENTS ÉLECTRONIQUES

Chloé SIMHA, Caractérisation ab initio des propriétés spectroscopiques des défauts dans le silicium, université de Toulouse.

Julien LOMONACO, Évaluation de la tenue des circuits intégrés aux effets de dose ionisante en environnement spatial, université Paris-Saclay.

SCIENCES DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT

Célian COURTNEY, Études des mécanismes d'absorption/dégradation de matériaux dopés pour la séparation des gaz rares, université Claude-Bernard de Lyon.

Gillien LATOUR, Modélisation et simulation 3D des écoulements et transports au sein d'un bassin versant, université de Toulouse.

Romain STEFANELLI, Approche mécanistique en radioécologie: processus d'accumulation de radionucléides dans les mollusques bivalves, université Côte d'Azur.

Louis ZAUGG, Apport de l'imagerie hyperspectrale pour la caractérisation optique des eaux industrielles, université Paris-Saclay.

Fanny LEHMANN, Métamodèle de la propagation d'ondes sismiques 3D par opérateur neuronal de Fourier (FNO) amélioré avec un transfert d'apprentissage, Centrale Supélec – Université Paris-Saclay.

Pierre PACHOLSKI, Recherche de traceurs spécifiques de la fabrication d'explosifs par spectrométrie de masse à très haute résolution, université de Lorraine.

Lucile PAUGET, Boundary Layer and Orographic Waves: Impact on climate and on infrasound propagation, ENS – Université PSL.

INSTRUMENTATION, MÉTROLOGIE ET CONTRÔLE

Emma JOUFFROY, Amélioration du système anticollision du LMJ par évaluation de sa fiabilité décisionnelle, université de Bordeaux.

MATÉRIAUX, PHYSIQUE DU SOLIDE

Nicolas ABOUAB, Matériaux sandwichs en composites à matrice céramique. Réalisation et caractérisation, modélisation du comportement thermomécanique, université de Bordeaux.

Killian BABILLOTTE, Caractérisation des effets collectifs dans l'endommagement des matériaux ductiles, université Paris-Saclay.

Arnaud BASSOULET-SAINTONGE, Élaboration d'un composite oxyde/oxyde à matrice d'aluminosilicate de baryum et fibres d'alumine, université de Bordeaux.

Maëlie CAUSSE, Propriétés des superhydrures à haute pression et à haute température, université Paris-Saclay.

Arthur CHARRUE, Développement de revêtements ultraréfractaires pour la protection de matériaux composites: étude du procédé de projection plasma et évaluation de comportement à des températures supérieures à 2000 K, université de Perpignan.

C. CHRISTOPHE*, Durabilité des alliages de titane nitrurés en milieu primaire, université Grenoble-Alpes.

Elliott DUBOIS, Utilisation des méthodes de Machine Learning pour la description des oxydes mixtes à l'échelle atomique, faculté de droit et de sciences – Aix-en-Provence.

Antoine GOSSET, Modélisation de la combustion de particules d'aluminium en milieu gazeux sous pression, INP Toulouse.

Valentin GLASZIOU, Étude expérimentale de combustion de particules d'aluminium en milieu gazeux sous pression, université d'Orléans.

Clément LAUTE, Conception et élaboration par fabrication additive de matériaux céramiques à porosité contrôlée - modélisation et propriétés physiques, université de Tours.

Pauline RICHARD, Équation d'état ab initio de l'or, université Paris-Saclay.

Annise RIVIÈRE, Granulométrie de particules dispersées par explosifs, IMT Mines Albi-Carmaux.

Jérôme SAUNIER, Simulation mésoscopique d'un matériau énergétique sous choc pour étudier sa transition vers la détonation, université de Poitiers.

MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE SCIENTIFIQUE, LOGICIEL

Bilel BENSÂÏD, Analyse et développements de nouveaux optimiseurs en machine learning, université de Bordeaux.

Benoît COSSART, Un solveur implicite à flux caractéristiques pour les écoulements stationnaires, université de Bordeaux.

Clément LASUEN, Schémas préservant l'asymptotique pour l'équation de transport sur maillages 2D non structurés, université Paris-Cité.

Sébastien MESTRALLET, Polycubes robustes pour le maillage hexaédrique structuré par blocs, université Paris-Saclay.

Khoa NGUYEN, Development and assessment of physics-informed deep learning methods: Towards multiphysics simulation in industrial contexts, ENS Paris-Saclay.

Valentin POSTAT, Représentation et optimisation de maillages structurés par blocs à l'aide de systèmes multi-agents, université Paris-Saclay.

Benjamin POSTE, Statistical signal processing for multiple source separation, université d'Orléans.

Clément RICHEFORT, Développement d'un solveur creux multi-niveau pour des problèmes d'électromagnétisme, université de Bordeaux.

Claire ROCHE, Génération de maillage hexaédrique 3D pour la rentrée atmosphérique, université Paris-Saclay.

Thomas VIGIER, Méthodes numériques cinétiques novatrices pour la radiothérapie et les plasmas, université de Bordeaux.

MÉCANIQUE ET THERMIQUE

Matthias AIME, Démarche de synthèse de l'environnement sous sollicitations mécaniques aléatoires et multiaxiales, Normandie Université.

Victor ASENSIO, Influence de la vitesse de montée en température sur les mécanismes de dégradation et de transfert de composites fibres de carbone et matrice biosourcée, université de Bordeaux.

Jérémy CHEVALIER, Modélisation des transferts thermiques dans les matériaux composites pyrolysables, université de Bordeaux.

Hugo GUICHARD, Étude des transformations de phases et des évolutions microstructurales au cours du forgeage d'un acier faiblement allié à haute limite d'élasticité, université de Lorraine-Institut Jean-Lamour.

Quentin HENRY, Étude du comportement mécanique des céramiques poreuses chargées en régime dynamique, Arts et Métiers.

Vincent LONGCHAMP, Modélisation de l'endommagement de céramiques projetées plasma sous sollicitations dynamiques à l'aide d'une approche multiéchelle discrète/continue, Ensam ParisTech.

Loïc SEYER, Modélisation du couplage conducto-radiatif par des techniques stochastiques dans des milieux hétérogènes, université de Poitiers.

Bruno VUILLOD, Développement de méta-modèles pour la modélisation de systèmes dynamiques complexes, université de Bordeaux.

OPTIQUE ET OPTRONIQUE

Jérôme DON JAYAMANNE, Modelling of dynamic multiple scattering of light in shock ejecta, université Paris Sciences et Lettres.

Sylvain GROSJEAN, Endommagement des optiques avec des irradiations multiples, Aix-Marseille université.

Léa LAFARGUE, Développement d'un nouveau pilote impulsions courtes pour l'injection d'une chaîne laser de puissance, université de Lille.

Arthur SOUTENAIN, Impact de la porosité des traitements multitouches (PVD) sur les performances optiques de lasers de puissance, université de Limoges.

PHYSIQUE DU NOYAU, ATOME, MOLÉCULE, PLASMAS

Emilien DENOUAL, Rayonnement térahertz émis par interaction laser-solide en régime relativiste, université Paris-Saclay.

Baptiste FRAISSE, Étude de la fission de ^{238}U induite par neutrons rapides, université Paris-Saclay.

Luis GONZALEZ-MIRET ZARAGOZA, Exploring dipole electric strength functions through QRPA: Systematic calculations and other developments, université Paris-Saclay.

Abel PIRES, Optimisation de la source X impulsionnelle par diffusion Compton inverse d'un accélérateur linéaire d'électrons, université Paris-Saclay.

Paul PROUST, Microscopic and dynamical description of the fission process including intrinsic excitations, université Paris-Saclay.

THERMOHYDRAULIQUE ET MÉCANIQUE DES FLUIDES

Kévin LEY, Rayleigh-Taylor turbulent réactif: grandes échelles, autosimilarité et mélange, École centrale de Lyon.

Sébastien THEVENIN, Apport de l'apprentissage statistique pour la modélisation des mélanges turbulents, université, Paris-Saclay.

NEUTRONIQUE ET PHYSIQUE DES RÉACTEURS

Nicolas GUILLEVIC*, Simulation Monte-Carlo de la fonction de transfert d'un réacteur nucléaire pour l'exploitation de mesures de bruit neutronique, université de Strasbourg.

Paul LARTAUD, Étude des mesures de corrélations neutroniques, modélisation et apprentissage automatique, estimation bayésienne de paramètres nucléaires, Institut polytechnique de Paris.

Thibault SAUZEDDE*, Développement d'une méthodologie de transposition des erreurs associées aux grandeurs corrélées de type nappe de puissance dans un réacteur, université Aix-Marseille.

 POSTDOCTORATS EN COURS EN 2024
CHIMIE

Charlotte BRUN, Spéciation moléculaire de radionucléides en milieu marin, DAM Île-de-France.

Guilherme CARNEIRO, Simulation par modélisation moléculaire de la séparation H_2 et D_2 par adsorption dans les zéolithes cationiques LTA, FAU et CHA, Valduc.

Vincent FIEGEL, Réactions chimiques et radiochimiques intervenant dans des produits contenant des actinides, Valduc.

Fanny GIGNAC, Analyse de nanoparticules d'oxydes d'actinides par dispersion de Taylor et *cleF*, DAM Île-de-France.

Martin LEVIER, Couplage EC-ICPMS pour la datation directe par mesure quasi simultanée du père et du descendant : applications aux couples Pa-U et Pu-U et pour la mesure isotopique d'échantillons de MOX, DAM Île-de-France.

Guilhem PEYBERNES, Exploration de solutions microfluidiques pour la fabrication de cibles pour la production d'énergie par fusion, Valduc.

Tanguy PICARD, Formulation de matériaux énergétiques par RAM, Le Ripault.

Maxime PUYO, Élaboration de co-cristaux de matériaux énergétiques, Le Ripault.

COMPOSANTS ET ÉQUIPEMENTS ÉLECTRONIQUES

Adrien HELLIER, Développement de potentiels interatomiques machine learning pour les cascades de déplacement dans les semi-conducteurs, DAM Île-de-France.

SCIENCES DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT

Léo ADENIS, Prise en compte des filiations et des phénomènes physico-chimiques dans la simulation du transport atmosphérique de radionucléides à longue distance, DAM Île-de-France.

Mounir ATIQ, Data mining appliqué aux séries temporelles d'activités volumiques du CND Radionucléides, DAM Île-de-France.

Claire BOUILLOT, Environnement et société : étude des dispositifs de concertation autour de sites du CEA, DAM Île-de-France.

Martin COLVEZ, Méthodes Galerkin discontinues hybrides pour la propagation sismo-acoustique, DAM Île-de-France.

Benjamin JEANNOT, Estimation de la recharge d'un aquifère par approche de type schéma de surface, DAM Île-de-France.

Grégoire HELLER, Inversion généralisée des propriétés énergétiques du signal sismique régional, DAM Île-de-France.

Samuel KRISTOFFERSEN, Amélioration des stratégies de déploiement de capteurs infrasonores par étalonnage sur site, DAM Île-de-France.

Aurélié LOUIS-NAPOLÉON, Simulation d'effondrements de terrain et des vagues associées par le code 3D OpenFoam, DAM Île-de-France.

Elyes OUERGI, Détection et quantification de panaches par imagerie hyperspectrale, DAM Île-de-France.

MATÉRIAUX, PHYSIQUE DU SOLIDE

Maxime BALESTRAT, Élaboration et caractérisation de matrices oxynitrides pour composites à matrice céramique, Le Ripault.

Rami BECHARA, Modélisation de l'infiltration chimique en phase vapeur (CVI) à gradient thermique, LCTS.

Oliviero BISTONI, Couplage électron-phonon en utilisant la dynamique moléculaire basée sur la DFT, DAM Île-de-France.

Clément DUVAL, Traitement complet des effets quantiques et anharmoniques par simulation ab initio, DAM Île-de-France.

Alexis FORESTIER, Construction d'un banc de diffusion Brillouin sous chauffage laser pour la mesure de l'équation d'état des prodets : mesure de la vitesse du son dans quelques fluides moléculaires simples H_2O , N_2 et CO_2 constitutifs des prodets, DAM Île-de-France.

Adrien FOURMONT, Mesures expérimentales de capacités calorifiques, de coefficients de diffusion sur plutonium pur et alliages et modélisation de la diffusion dans ces alliages, Valduc.

Antoine HILBERER, Changements électroniques des matériaux sous très hautes pressions à l'aide d'un banc de mesure de réflectivité infrarouge et visible : application à Au, LiH et Na, DAM Île-de-France.

Joël KEUMO, Dimensionnement multi-échelle de composites à matrice céramique par approche hybride modélisation numérique et machine learning, LCTS.

Ioanna LYGATSIKA, Mise en œuvre d'un algorithme de diagonalisation pour la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT), DAM Île-de-France.

Corentin PERDERISET, Étude in situ des mécanismes d'adsorption de molécules gazeuses et d'apparition de produits de corrosion sur matériaux métalliques par PM-IRRAS (spectroscopie infrarouge de réflexion-absorption par modulation de polarisation), Valduc.

MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE SCIENTIFIQUE, LOGICIEL

Mathias BARAY, Développement de méthodes d'éléments finis d'ordre élevé en équations intégrales pour l'EM, Cesta.

Benjamin DUFOUR, Développement d'un code numérique permettant de simuler le modèle phénoménologique décrivant les interactions de plasmas en milieu liquide conduisant à la formation d'une mousse métallique, Valduc.

Romane HELIE, Élaboration d'un module de magnétohydrodynamique résistive avec terme de champ magnétique autogénéré dans un code 3D massivement parallèle, DAM Île-de-France.

Ilyes MOUFID, Modélisation et optimisation de métasurfaces en EM, Cesta.

Vincent SOUVETON, Développement de métamodèles pour la simulation rapide des ondes de choc 3D, DAM Île-de-France.

MÉCANIQUE ET THERMIQUE

Antoine BIDENT, Comportement mécanique de carbonés anisotropes, LCTS.

Agathe CURNIS, Impact des paramètres d'élaboration sur les propriétés métallurgiques et mécaniques de pièces élaborées par dépôt de fil laser / Identification, élaboration et mise en forme de matériaux pour mesures de propriétés thermophysiques sur alliages d'actinides liquides, Valduc.

Bousoura HOUSSEM, Caractérisation et modélisation des composites à matrice céramique à chaud, LCTS.

Nicolas LAFORGE, Simulation mécanique d'un capteur piézoélectrique et d'un tube à choc d'étalonnage, DAM Île-de-France.

OPTIQUE ET OPTRONIQUE

Martin MAILLARD, Étude de l'endommagement laser des réseaux de diffraction sur le LMJ, Cesta.

Paul QUINOMAN, Modélisation du pompage d'un amplificateur à haute répétition, Cesta.

INSTRUMENTATION, MÉTROLOGIE ET CONTRÔLE

Alexandre LERNER, Étude expérimentale et théorique de capteurs à base de fibres optiques, Cesta.

PHYSIQUE DU NOYAU, ATOME, MOLÉCULE, PLASMAS

Giacomo ACCORTO, Information quantique et scission nucléaire, DAM Île-de-France.

Khalil ALIANE, Adaptation des cibles hélicoïdales aux lasers en cadence pour l'accélération d'ions, Celia.

Duncan BARLOW, Définition d'un design pour la génération d'énergie par la fusion par confinement inertiel, DAM Île-de-France.

Guillaume BOUCHARD, Interaction laser-plasma en faisceaux lissés et conditions réalistes via des simulations cinétiques, DAM Île-de-France.

Philippe da COSTA, Ingrédients ab initio pour la description des réactions nucléaires, DAM Île-de-France.

David DUREL, Généralisation de la méthode QRPA via l'extension des codes ISAAC et XpN pour le traitement des noyaux triaxiaux et octupolaires, DAM Île-de-France.

Cyril LENAIN, Mesures des spectres et des multiplicités de neutrons prompts suite à la fission de ^{238}U , DAM Île-de-France.

Aurélia MAIOLO, Conception de cibles FCI pour la production d'énergie par fusion inertielle, Celia.

Stylios PASSALIDIS, Étude des instabilités plasma relativistes dans l'interaction laser-plasma et faisceau-plasma, DAM Île-de-France.

Paul PROUST, Groupe de renormalisation fonctionnel pour la structure nucléaire, DAM Île-de-France.

Eli TEMANSON, Étude de la fission au LEEN, DAM Île-de-France.

Lars ZUREK, Application des techniques de factorisation de tenseurs au problème nucléaire à N corps, DAM Île-de-France.



S. Liberatore, P. Gauthier, J.-L. Willien, O. Landoas, B. Villette CEA - DAM, centre DAM Île-de-France
P.-É. Masson-Laborde, F. Philippe, O. Poujade CEA - DAM, centre DAM Île-de-France
Paris-Saclay, CEA, Laboratoire matière en conditions extrêmes (LMCE), Bruyères-le-Châtel
R. Botrel CEA - DAM, centre de Valduc
O. Henry CEA - DAM, centre du Cesta

Laser Mégajoule : succès de la première expérience de fusion

La première expérience de fusion nucléaire réalisée sur le Laser Mégajoule a été un grand succès [1,2]. La réussite de cette expérience complexe tient à la performance de l'installation Laser Mégajoule et à la qualité de nos outils de simulation 3D, autant qu'à la compétence des physiciens, ingénieurs et techniciens qui les mettent en œuvre. Elle marque le franchissement d'un jalon majeur du programme Simulation du CEA - DAM pour la garantie des armes nucléaires françaises.

Lorsque du deutérium est comprimé et chauffé à des millions de degrés, soit une température proche de celle régnant au centre du Soleil, des réactions de fusion nucléaire se produisent. Lors de la première expérience de fusion nucléaire sur le Laser Mégajoule, ces réactions ont été obtenues et détectées par les neutrons dont ils sont la signature. En effet, la simulation du fonctionnement de la phase nucléaire d'une arme de dissuasion repose sur des modèles qui doivent être validés. Cette validation passe par des expériences de physique extrêmes, ce qui a nécessité la construction du Laser Mégajoule.

Pour atteindre la fusion sur le Laser Mégajoule, une cible de moins d'un centimètre de longueur est placée au centre d'une sphère de dix mètres de diamètre : la chambre d'expériences. Cette cible est constituée d'une cavité en or qui contient une petite bille en plastique de la taille d'une tête d'épingle, aussi appelée capsule, remplie de deutérium (FIGURE 1A).

Regroupés par quatre, les faisceaux laser entrent dans la cible par deux trous situés aux deux extrémités de la cavité (FIGURE 1A). Ils se propagent et atteignent les parois internes qui les absorbent. La coupe longitudinale de la FIGURE 1B montre l'impact de ces faisceaux. Cette absorption laser chauffe les parois internes en or, qui se détendent en émettant du rayonnement X. C'est ce rayonnement X qui exerce une pression sur toute la

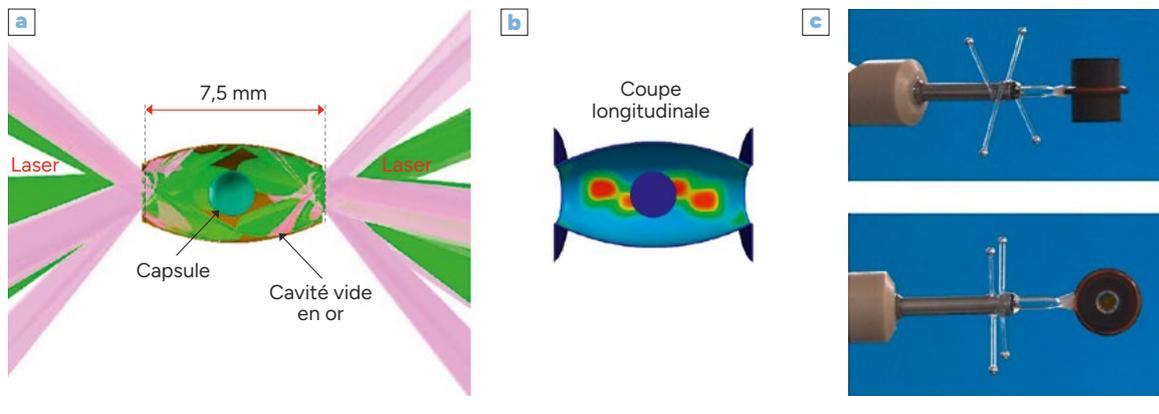
surface de la capsule qui s'effondre sur elle-même et, de ce fait, comprime le deutérium.

Cette campagne expérimentale a été réalisée avec les 48 premiers faisceaux disponibles sur le Laser Mégajoule, qui en aura 176 à terme. Ceux-ci ont produit douze taches laser, les faisceaux arrivant par quatre, et un rayonnement X qui a permis d'atteindre les conditions de la fusion. Cependant, dans cette configuration à douze paquets de quatre faisceaux, le rayonnement X n'était pas uniforme sur la capsule et certaines zones étaient plus comprimées que d'autres : la compression du deutérium n'était pas sphérique, mais asymétrique.

L'expérience a été conçue en anticipant le fait que l'asymétrie de la compression aurait pour effet de limiter puis de stopper les réactions de fusion. La conception a été rendue possible grâce à des simulations numériques à trois dimensions (3D). Les simulations 3D sont d'autant plus importantes que la configuration expérimentale s'éloigne de la configuration nominale avec les 176 faisceaux, où la quasi-sphéricité de la compression de la capsule autorise au premier ordre une simulation à deux dimensions.

Ces calculs 3D ont été réalisés avec le code Troll [3] développé au CEA-DAM. Ce code contient les modèles décrivant les phénomènes physiques complexes mis en jeu dans l'expérience. Les simulations ont permis de choisir les dimensions optimales de la cible et de

FIGURE 1



→ [a] Les 48 faisceaux laser, en rose et en vert selon l'angle d'entrée dans la cavité, y pénètrent par deux trous situés à ses extrémités. De dimensions comparables à celles d'une tête d'épingle, la capsule en plastique remplie de deutérium (en bleu turquoise) est positionnée au centre de la cavité. [b] Une coupe longitudinale de cette cible montre en rouge l'impact des faisceaux laser sur la paroi intérieure de la cavité. Chaque tache correspond à quatre faisceaux laser. [c] Photographies en vue de profil et de face de la cible. Le cliché du bas montre la capsule placée au centre de la cavité.

prévoir les résultats expérimentaux, en particulier l'émission du rayonnement X et le nombre de neutrons produits. Ces calculs indiquent que, malgré sa déformation, le deutérium contenu dans la bille chauffée et se comprime suffisamment pour atteindre les conditions de la fusion.

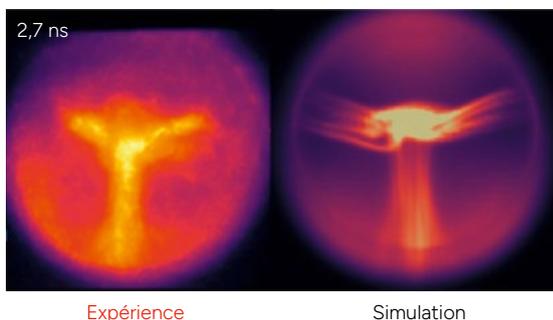
L'accord entre les simulations 3D et l'expérience est très satisfaisant (FIGURE 2), il valide les modèles implémentés dans le code. Lors de l'expérience, une image du rayonnement X est enregistrée avant le démarrage des réactions de fusion. À cet instant, les parois d'or sont chauffées et en phase de détente,

elles collisionnent au centre de la cavité. Une forme en Y (FIGURE 2) est obtenue pour l'émission X, caractéristique de l'asymétrie liée à l'utilisation de 48 faisceaux.

La conception a également été réalisée pour qu'un maximum de neutrons soit produit avant que la déformation liée à l'asymétrie ne stoppe les réactions de fusion. À l'issue de la phase de fusion nucléaire du deutérium, le nombre de neutrons mesurés dans l'expérience s'est élevé à quelques centaines de milliards. Cette valeur est conforme à celle prévue par la simulation.

Cette première campagne expérimentale est le début d'une longue série. Les expériences seront de plus en plus complexes avec un nombre croissant de faisceaux et une énergie sur cible de plus en plus importante.

FIGURE 2



→ En captant le rayonnement X émis par la cible, une image de celle-ci a été enregistrée avant le démarrage des réactions de fusion par le trou d'entrée laser supérieur. La même image a été calculée grâce à la simulation numérique. Les images obtenues sont similaires, ce qui valide les modèles utilisés dans le code de simulation. Cette forme en Y est caractéristique de la configuration particulière à 48 faisceaux, en douze paquets de quatre faisceaux.

RÉFÉRENCES

- 1 — S. Liberatore et al. « First indirect drive inertial confinement fusion campaign at Laser Megajoule », *Physics of Plasmas*, **30**, 122707, <https://doi.org/10.1063/5.0176446> (2023).
- 2 — W. Cayzac et al. « Experimental capabilities of the LMJ-PETAL facility », *High Energy Density Physics*, **52**, 101125, <https://doi.org/10.1016/j.hedp.2024.101125> (2024).
- 3 — E. Lefebvre et al. « Development and validation of the TROLL radiation-hydrodynamics code for 3D hohlraum calculations », *Nuclear Fusion*, **59**, 032010, <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aacc9c> (2019).



Des pulsations du Soleil à son opacité

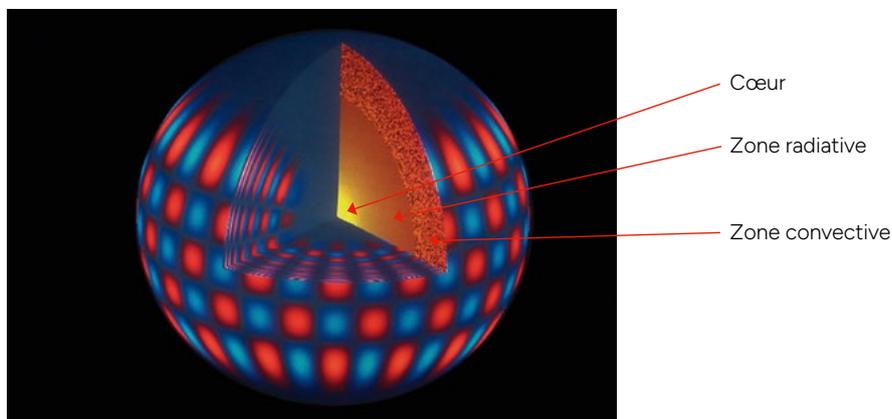
La garantie de performances des armes de la dissuasion nucléaire française repose sur le programme Simulation du CEA - DAM qui vise à modéliser les phénomènes physiques décrivant le fonctionnement de ces armes. Mais les phénomènes se produisent dans des conditions de pression et de température extrêmes, difficilement accessibles à l'expérience. Or, de telles conditions existent naturellement dans les étoiles, et notamment le Soleil. C'est pourquoi le CEA - DAM utilise notre étoile comme un véritable laboratoire pour la physique atomique. Il permet de valider nos calculs de données physiques, ingrédients indispensables de la dissuasion. Nous avons pu notamment, grâce au Soleil, remonter à une donnée cruciale : la capacité d'absorption de la lumière (l'opacité) [1].

Le Soleil vibre. C'est une bonne nouvelle pour les physiciens, car l'étude de ses pulsations permet de comprendre sa structure interne [2] : c'est le principe de l'héliosismologie. En effet, on peut ainsi comprendre comment les ondes se propagent au sein de l'étoile, et en déduire ce qui la constitue. C'est ainsi que l'on sait que le Soleil est formé (FIGURE 1) d'un cœur (où ont lieu les réactions de fusion thermonucléaire), enveloppé d'une zone radiative (où l'énergie est transportée par les photons), elle-même enveloppée

d'une zone convective (où l'énergie est évacuée par convection de la matière). Notre connaissance est précise : la limite entre ces deux dernières zones est établie au millième près, à 0,713 rayon solaire.

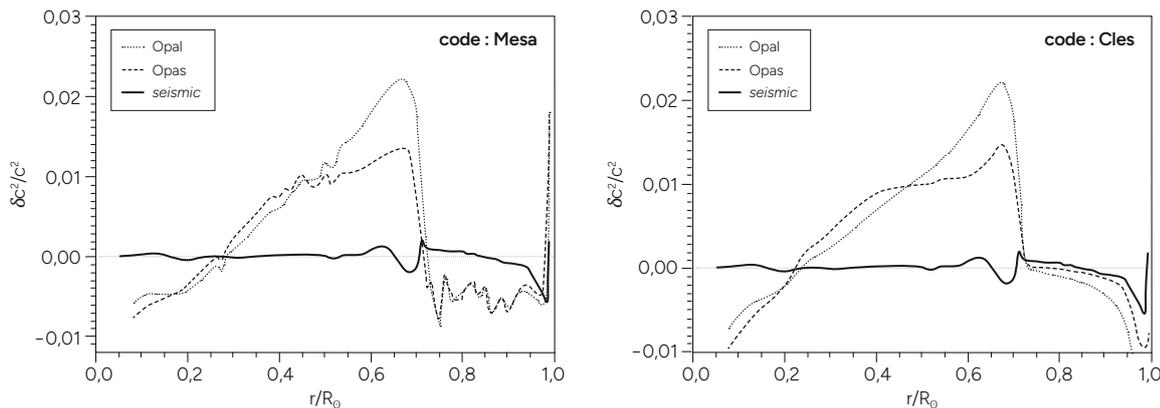
La modélisation de la zone radiative fait appel à la physique des plasmas chauds, cet état de la matière ressemblant à une soupe d'ions et d'électrons. Les photons y sont absorbés et réémis par la matière ionisée sur des distances moyennes de l'ordre du millimètre. C'est la raison pour laquelle on entend parfois

FIGURE 1



—> Schéma du Soleil parcouru par des ondes de pression (en rouge et bleu), et des différentes zones que leur étude révèle : le cœur (en jaune), la zone radiative (en brun) et la zone convective (en orange et noir) © Soho (Nasa et Esa).

FIGURE 2



→ Carré de l'erreur relative entre la vitesse du son simulée et celle déduite de l'héliosismologie, le long du rayon solaire, par deux codes de structure stellaire (Mesa et Cles) utilisant soit les opacités issues de modèles de physique atomique (Opal et Opas), soit des opacités « ajustées » pour minimiser cette erreur (seismic) [3].

qu'« un photon met plus de 100 000 ans à sortir du Soleil ».

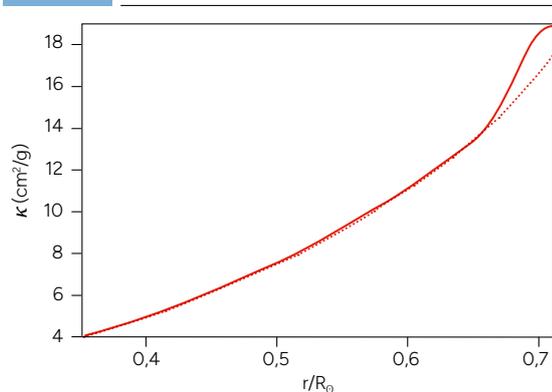
Une des données importantes pour décrire ce milieu est donc l'opacité, c'est-à-dire sa capacité à absorber la lumière. Or, les calculs de cette opacité sont ardues : il faut estimer la manière dont les photons sont absorbés et réémis par chaque ion ou chaque électron libre. Et même si les équations de base de la physique quantique sont connues depuis près d'un siècle, c'est la multitude des interactions entre toutes les composantes du plasma qui oblige à faire des hypothèses pour le décrire. C'est pourquoi chaque équipe élabore ses propres hypothèses, que les modèles donnent parfois des résultats assez différents et qu'aucun n'est capable de reproduire parfaitement les observations.

Dans la démarche suivie dans nos travaux [1], nous allons au-delà du simple constat de différence entre simulation et observation. En imposant des

contraintes héliosismiques (déduites de l'observation) dans la simulation numérique (qui utilise en entrée des opacités calculées), nous pouvons, en chaque rayon de l'étoile, déduire quel écart d'opacité est nécessaire pour vérifier ces contraintes. L'opacité déduite de ces calculs dépend donc encore de la valeur d'opacité que nous entrons. Mais nous pouvons ainsi évaluer si cette valeur est juste, et sinon, concentrer nos efforts théoriques dans les zones de moindre accord. Un exemple de comparaison est donné sur la FIGURE 3 pour les opacités Opal (produites par le Lawrence Livermore National Laboratory et massivement utilisées pour la modélisation stellaire) : l'écart peut atteindre une dizaine de pour cent, mais seulement dans une zone restreinte, vers 0,65 rayon du Soleil, où l'opacité attendue est supérieure à celle calculée. Cela conforte les ajustements évoqués dans la FIGURE 2.

Cette avancée, à laquelle ont contribué les codes SCO-RCG [4] et Opas du CEA-DAM, devrait redéfinir notre compréhension à la fois des processus physiques qui régissent les étoiles et de l'évolution de ces dernières. Avec de potentiels impacts cosmologiques sur leur masse et leur âge (ainsi que celui de leurs exoplanètes) et la distance depuis laquelle nous pensons les observer.

FIGURE 3



→ Opacité dans la zone radiative, le long du rayon solaire, issue du modèle de physique atomique Opal, soit directement (courbe en pointillé), soit après la nouvelle procédure de reconstruction (courbe pleine). L'essentiel de l'écart porte sur quelques centièmes de rayon solaire (0,68-0,71), où quelque dix pour cent supplémentaires d'opacité suffiraient donc à rétablir l'accord entre simulation et mesures héliosismiques.

RÉFÉRENCES

- 1 G. Buldgen, J.-C. Pain, P. Cossé et al. « Helioseismic inference of the solar radiative opacity », *Nature Communications*, **16**, 693, <https://doi.org/10.1038/S41467-024-54793-y> (2025).
- 2 J. Christensen-Dalsgaard « Solar structure and evolution », *Living Reviews in Solar Physics*, **18**, 2 (2021).
- 3 M. Le Pennec, S. Turck-Chièze, S. Salmon et al. « First new solar models with the OPAS opacity tables », *The Astrophysical Journal Letters*, **813**, L42 (2015).
- 4 J.-C. Pain, F. Gilleron « Accounting for highly excited states in detailed opacity calculations », *High Energy Density Phys.*, **15**, 30 (2015).



L. Gremillet CEA - DAM, centre DAM Île-de-France /

Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, Bruyères-le-Châtel

V. Ospina-Bohórquez CEA - DAM, centre DAM Île-de-France /

Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, Bruyères-le-Châtel /

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

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

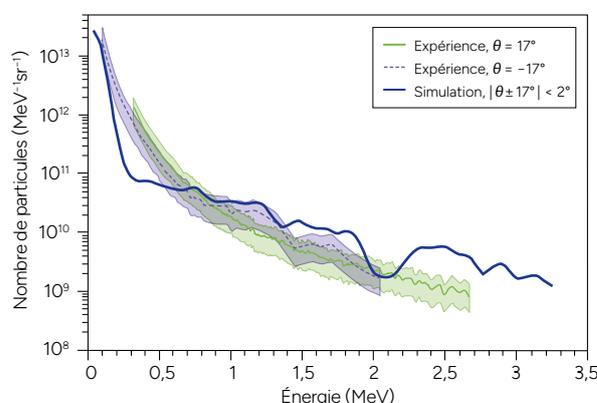
Des ions catapultés dans un gaz par un laser ultra-intense et ultrabref

Une expérience pionnière pilotée par l'université de Bordeaux et le CEA – DAM a montré que l'interaction entre un gaz dense et une impulsion laser ultra-intense de quelques dizaines de femtosecondes peut conduire à une production importante d'électrons et surtout d'ions énergétiques. Les caractéristiques du laser utilisé rendent ces sources de particules disponibles avec une grande fréquence de tirs [1], cadence indispensable pour la mesure de ralentissement d'ions dans un plasma par exemple. La simulation numérique a permis de dévoiler les mécanismes responsables de la génération de ces particules.

Les accélérateurs de particules sont des outils indispensables pour explorer les secrets de la matière, créer en laboratoire de nouveaux éléments en physique nucléaire, ou produire les rayonnements pénétrants utilisés en radiographie et radiothérapie. Ils fonctionnent grâce à des champs électriques qui propulsent des particules chargées (électrons ou ions) à des vitesses avoisinant celle de la lumière. La taille et le coût des accélérateurs conventionnels limitent cependant leur emploi; aussi des méthodes plus compactes sont-elles recherchées, notamment au moyen de lasers ultra-intenses.

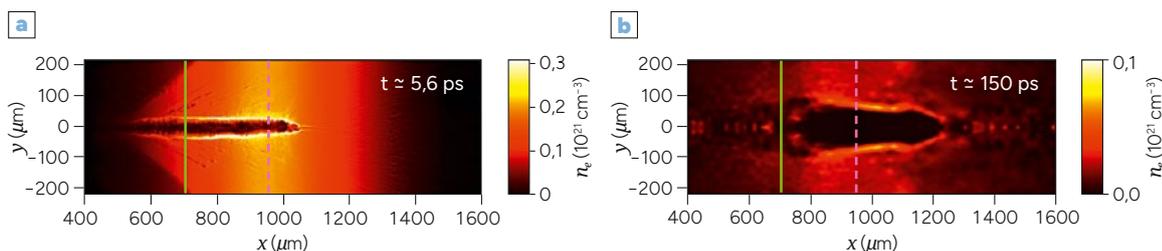
Imaginez l'énergie lumineuse d'une lampe torche délivrée non pas en quelques secondes, mais en quelques dizaines de femtosecondes (10^{-15} s) et de surcroît concentrée dans une tache de quelques micromètres (10^{-6} m) de diamètre. C'est la prouesse accomplie par les lasers ultra-intenses, qui atteignent désormais des puissances de plusieurs pétawatts (10^{15} W), donnant lieu à des champs électromagnétiques phénoménaux

FIGURE 1



→ Distributions des ions He^{2+} détectés (vert à 17° , violet à -17°) et simulés (bleu) en fonction de leur énergie. La simulation numérique reproduit de façon satisfaisante les mesures.

FIGURE 2



→ Carte de la densité électronique du plasma [a] prédite par la simulation numérique 5,6 ps après l'arrivée du laser, et [b] reconstruite grâce à un diagnostic d'interférométrie 150 ps après l'interaction. La ligne verte indique le plan focal du laser au-delà duquel il divergerait lorsqu'il se propage dans le vide. Les deux cartes confirment la formation d'un canal s'étendant au-delà du pic de densité du plasma (ligne en tirets roses).

(supérieurs à 10^{12} V/m), sans équivalent sur Terre. Toute cible exposée à de tels flashes de lumière est transformée en un plasma, l'état de la matière des étoiles, où les électrons sont violemment arrachés aux ions et accélérés à très haute énergie. Plus lourds, les ions ne ressentent pas directement le laser, mais les champs induits par le déplacement des électrons, des champs assez forts pour les accélérer jusqu'à quelques dixièmes de la vitesse de la lumière en à peine une centaine de femtosecondes [2].

Les faisceaux d'ions ainsi créés s'illustrent par une brièveté et une densité hors de portée des accélérateurs conventionnels, des propriétés exploitées pour sonder des phénomènes rapides, chauffer des plasmas denses ou produire des sources intenses de neutrons. Certaines de ces applications requièrent toutefois une cadence de tir élevée (plus d'un tir par seconde), peu compatible avec les cibles solides couramment employées, qui engendrent des débris susceptibles d'endommager les optiques ou les cibles adjacentes.

Une solution possible fait appel à des jets de gaz supersoniques qui, une fois ionisés, produisent des plasmas relativement denses (dix à cent fois la densité atomique de l'air), favorables à une absorption efficace de l'énergie laser. Cependant, outre que les processus d'accélération ionique y sont moins bien connus que dans les solides [3], la mise en œuvre de telles cibles pose plusieurs défis, comme la maîtrise du profil de densité ou le pointage du faisceau laser.

Pour appréhender ces difficultés, et apprendre à les maîtriser, une équipe internationale, menée par l'université de Bordeaux et le CEA-DAM, a réalisé une expérience pionnière sur l'installation Vega-3 du Centro de Láseres Pulsados (CLPU) de l'université de Salamanca, en irradiant un jet de gaz d'hélium à haute densité avec une impulsion laser ultrabrève de puissance pétawatt [1].

Pour la première fois dans de telles conditions, des ions (He^{2+}) accélérés dans la direction de propagation du laser (à un angle d'environ 17°) ont

été observés, jusqu'à une énergie d'environ 2,7 MeV. Une émission importante d'électrons rapides a également été détectée dans la même direction, avec une énergie d'environ 10 MeV. La FIGURE 1 illustre les mesures ioniques.

La simulation numérique de l'expérience, avec le code Calder conçu au CEA-DAM, montre que l'accélération ionique résulte de l'expansion du canal « creusé » par le laser dans le plasma, une structure mise en évidence par interférométrie (FIGURE 2). De forts champs électriques sont localisés sur les parois de ce canal, qui balayent les ions ambiants tel un chasse-neige. Bien que ce mécanisme favorise une accélération radiale, les ions initialement situés près de l'extrémité du canal sont projetés dans un large cône vers l'avant, et à des énergies cohérentes avec les mesures.

Même si leur reproductibilité à haute cadence reste à consolider, ces résultats sont encourageants pour des usages requérant un grand nombre de tirs, par exemple pour des mesures précises de ralentissement ionique dans la matière [4], un élément clé pour les expériences de fusion par confinement inertiel.

RÉFÉRENCES

- 1 — V. Ospina-Bohórquez et al. « Laser-driven ion and electron acceleration from near-critical density gas targets: towards high-repetition rate operation in the 1 PW, sub-100 fs laser interaction regime », *Physical Review Research*, **6**, 023268 (2024).
- 2 — A. Debayle et al. « Accélération d'ions par laser », dans *Sources photoniques et de particules produites par laser*, revue *chocs*, **49**, p. 41-49 (2019).
- 3 — V. Ospina-Bohórquez et al. « Ion acceleration from the interaction of ultrahigh-intensity laser pulses with near-critical density, nonuniform gas targets », *Physics of Plasmas*, **31**, 013102 (2024).
- 4 — W. Cayzac et al. « Les protons pénètrent plus loin que prévu dans les plasmas denses et tièdes », *chocs Avancées*, **17**, p. 12-13 (2023).



Des fragments de fission froide à la forme inattendue

Lorsqu'un noyau d'atome se casse en deux, dans la fission nucléaire, quelle est la forme des fragments ? Une équipe du CEA - DAM a étudié un type de fission très rare, la fission dite froide. Elle a montré que les fragments étudiés sont déformés alors qu'on les attendait sphériques [1]. Ce résultat permet d'enrichir la compréhension du processus de fission pour le programme Simulation du CEA - DAM.

Bien que largement utilisée par les humains pour la production d'énergie, la fission nucléaire est loin d'avoir livré tous ses secrets. Au centre de l'atome, imaginons le noyau atomique comme une goutte de protons et de neutrons. Les protons, particules chargées électriquement contrairement aux neutrons, se repoussent sous l'effet de l'interaction coulombienne. Lorsqu'il n'y a pas trop de protons dans la goutte, la cohésion de cette dernière est assurée par l'interaction dite forte entre protons et neutrons. Mais pour les noyaux contenant trop de protons, la goutte s'étire et finit par se séparer en deux gouttes plus petites, les fragments : c'est ce qu'on appelle la fission nucléaire.

Dans la majorité des cas, les gouttes produites sont « chaudes », car les fragments ont beaucoup d'énergie. Dans ce cas, ils « évaporent » des neutrons (on parle d'évaporation, car la perte de neutrons permet de diminuer l'énergie du fragment). Très rarement, les gouttes sont « froides » et aucun neutron n'est émis : on parle alors de fission froide. Pour autant, même pour des fissions froides, les fragments peuvent avoir de l'énergie : la goutte vibre et tourne sur elle-même. Jusqu'alors, les physiciens pensaient que les fragments produits dans la fission froide étaient peu déformés et ne pouvaient donc pas tourner.

L'équipe de chercheurs a étudié la fission du californium 252, qui contient 252 protons et neutrons (on dit que la masse du noyau est de 252). Une première

prouesse a été de déposer du californium sur une feuille en carbone ultramince de 25 nm d'épaisseur, soit deux millions de fois plus fine qu'une feuille de papier. Cela était nécessaire pour permettre aux fragments de fission de traverser la feuille ultramince sans être trop perturbés. Cette fission froide ne se produit que pour environ deux fissions sur mille. Autant ne pas manquer ces événements rares !

Au cours d'une fission, les deux fragments produits ionisent un gaz, générant un signal électrique. Celui-ci permet non seulement de détecter les fragments, mais aussi de déterminer leur masse. Afin de savoir si la fission est froide, les chercheurs vérifient si la somme des masses des deux fragments détectés est égale à la masse du noyau de californium qui fissionne (252). Si c'est le cas, alors aucun neutron n'a été émis. En plus d'analyser la nature des fragments, on regarde leurs propriétés en mesurant les photons qu'ils émettent. Ceux-ci sont détectés grâce à 54 détecteurs à base d'iode de sodium arrangés en cube autour de la double chambre d'ionisation (FIGURE 1).

Parmi les résultats obtenus, un en particulier a attiré l'œil des physiciens. Il correspond au cas exceptionnel où le noyau de californium 252 se casse en une paire d'étain 132 et de cadmium 120. Qu'y a-t-il d'exceptionnel ici ? Le fait que les données recueillies montrent clairement que le fragment lourd, l'étain 132, n'emporte pas du tout d'énergie lors de la fission froide. C'est la première fois que cela est observé. Les chercheurs ont

FIGURE 1

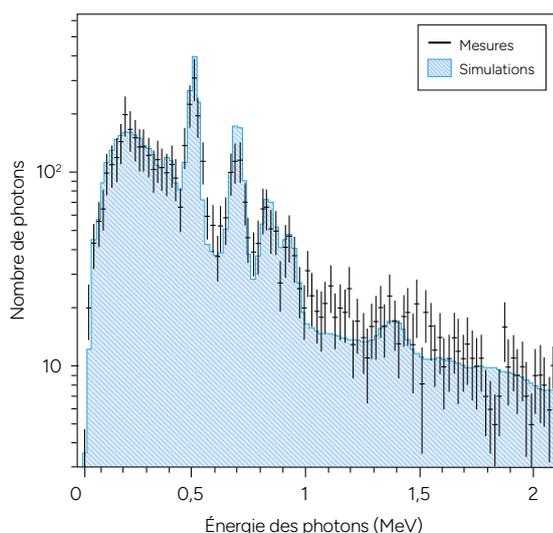


→ Photographie du dispositif expérimental utilisé dans cette étude, en cours de montage. Les 54 détecteurs de photons forment un cube, dont l'arête mesure 33 cm. Une partie de la face avant du cube n'est pas encore installée, permettant d'apercevoir l'enveloppe cylindrique de la double chambre d'ionisation. Le dépôt de californium 252 ultramine se trouve au centre de cette chambre.

donc déduit que toute l'énergie disponible était emportée par le fragment léger, le cadmium 120, qui est, dans ce cas, le seul à pouvoir émettre des photons.

La suite de l'étude a alors consisté à tenter de déduire les propriétés du cadmium 120 au moment

FIGURE 2



→ Nombre de photons émis par le cadmium 120 à différentes énergies lors de la fission « froide » du californium 252. La comparaison du spectre des photons mesurés au spectre simulé en supposant une déformation importante pour le cadmium 120 donne un accord satisfaisant.

de la fission, grâce aux photons détectés durant l'expérience. L'équipe a montré que les photons détectés ne peuvent être émis par le cadmium 120 que si ce dernier est très déformé. Souvenez-vous de l'image des gouttes nucléaires qui vibrent et qui tournent. Un noyau déformé en forme de ballon de rugby peut tourner. Cela s'accompagne d'une émission de photons. Plus il se déforme, plus il tourne vite et émet de photons. C'est ce qu'ont observé les chercheurs : afin de reproduire les données (FIGURE 2), ils ont dû considérer que le cadmium 120 est trois fois plus déformé lors de la fission froide qu'il ne l'est dans son état de plus basse énergie. Il émet ainsi un nombre plus important de photons.

Les résultats de cette étude ont permis de modifier la représentation de la fission froide et de valider une approche théorique décrivant la déformation et la rotation des fragments dans la fission. De quoi améliorer les modèles décrivant la fission, aussi bien pour le programme Simulation que pour comprendre la création de noyaux d'atomes dans les étoiles.

RÉFÉRENCES

- 1 — A. Francheteau, L. Gaudefroy, G. Scamps, O. Roig, V. Méot, A. Ebran, G. Bélier « Scission deformation of the $^{120}\text{Cd}/^{132}\text{Sn}$ neutronless fragmentation in $^{252}\text{Cf}(sf)$ », *Phys. Rev. Lett.*, **132**, 142501 (2024).



N. Pillet, P. Carpentier, N. Dubray, D. Regnier CEA - DAM, centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire matière en conditions extrêmes (LMCE), Bruyères-le-Châtel
D. Lacroix Laboratoire de physique des deux infinis Irène-Joliot-Curie (IJCLab), UMR 9012 CNRS -
Université Paris-Saclay – Université Paris Cité, Orsay

Percée majeure dans la description théorique de la fission nucléaire

Une collaboration entre le CEA - DAM et le CNRS a permis pour la première fois de reproduire par le calcul le processus complet de déformation d'un noyau atomique lors de sa fission [1]. Les propriétés des fragments, données capitales pour une compréhension fondamentale de ce phénomène, sont désormais à portée des supercalculateurs. Pour les applications civile et militaire, des simulations numériques plus prédictives deviennent possibles.

Dans le monde de l'infiniment petit, la fission nucléaire est un phénomène aussi fascinant que complexe. Au cours de ce processus, le noyau de l'atome, constitué de neutrons et de protons, se déforme et finit par se fragmenter en deux noyaux plus petits, appelés fragments de fission. Par exemple, un noyau de plutonium 240 (94 protons et 146 neutrons) peut se fragmenter en un noyau de molybdène 106 (42 protons et 64 neutrons) et un noyau de tellure 134 (52 protons et 82 neutrons) ; il peut aussi se fragmenter en une multitude d'autres paires de fragments. Lors de la séparation, les deux fragments se partagent une énergie importante qui se caractérise par leur mise en mouvement rapide et par l'émission de neutrons, de photons et d'électrons. L'ensemble des propriétés des fragments produits (nombre de protons, de neutrons, forme, énergie cinétique, etc.) et de celles des particules qu'ils émettent (nombre, énergie, etc.) constitue la pierre de Rosette que les Champollion de la physique nucléaire cherchent à reconstituer pour déchiffrer la complexité de ce phénomène quantique.

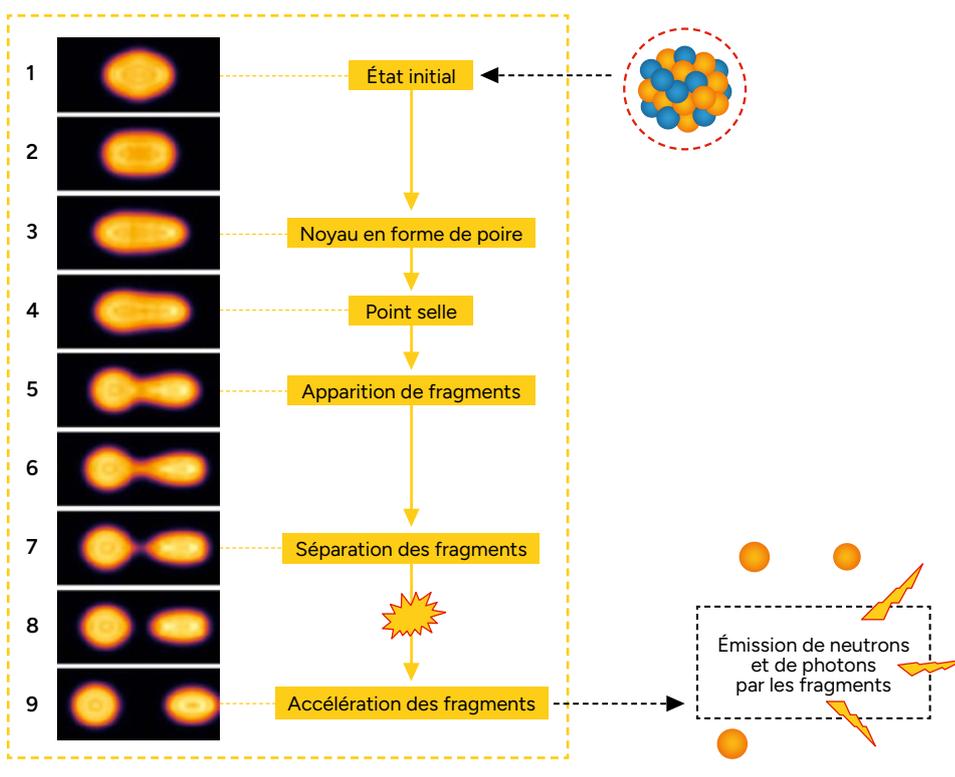
Dans les applications civiles et militaires que l'on souhaite maîtriser toujours plus finement, des simulations numériques sont réalisées et nécessitent des données d'entrée que sont les propriétés des fragments et des particules émises. Ces données sont aujourd'hui issues de mesures et de calculs phénoménologiques incomplets. Ces simulations reproduisent des observations, mais le CEA souhaite parvenir à des simulations

plus prédictives. C'est pourquoi nous réalisons des simulations dites microscopiques, c'est-à-dire reposant sur des modèles théoriques fondamentaux dépourvus de paramètres ajustables.

Comme la mesure simultanée de toutes les propriétés pour une même fragmentation reste un défi expérimental, impossible à relever, leur prévision par un calcul microscopique, prenant en compte tous les aspects du phénomène dans toutes ses dimensions, serait l'idéal ! Mais voilà : le calcul microscopique de la fission d'un noyau était lui aussi jusqu'à présent un défi impossible à relever, même sur les supercalculateurs les plus puissants. En effet, les équations de la mécanique quantique doivent être résolues pour des systèmes à un grand nombre de corps (240 dans le cas mentionné plus haut). Des stratégies ont certes été élaborées pour abaisser la complexité du problème à résoudre et le calcul est possible jusqu'au-delà du « point selle » (voir état 4 de la **FIGURE 1**). Mais les physiciens butent alors sur des discontinuités qui affectent la bonne déformation du noyau en train de fissionner et l'empêchent de parvenir jusqu'à l'apparition puis la séparation des fragments.

Au CEA-DAM, nous avons mis en œuvre avec le CNRS des méthodes de calcul innovantes qui ont permis de supprimer ces discontinuités [1,2]. Elles reposent sur la mise en place d'une similarité entre deux formes consécutives du noyau en train de fissionner. Cerise sur le noyau, elles ont également levé certaines limitations et conduit au calcul de la séparation quantique des deux

FIGURE 1



→ Principales étapes du processus de fission du plutonium 240. Les images issues de notre calcul représentent l'évolution des densités de matière, constituée de protons et de neutrons, lors de l'allongement du plutonium 240. Les densités sélectionnées décrivent des formes caractéristiques qu'il adopte. Les fragments obtenus à la fin du processus de séparation correspondent ici au molybdène 106 et au tellure 134. Notre calcul permet pour la première fois de prédire toutes les propriétés des fragments.

fragments (la fameuse désintrinsication). Les perspectives de cette nouvelle approche sont immenses, car elle ouvre la porte à la prévision par un calcul microscopique de l'ensemble des propriétés des fragments et de celles des particules qu'ils émettent. Le caractère prédictif des simulations pour les applications devrait en être considérablement augmenté.

Un bon croquis valant mieux qu'un long discours, nous présentons sur la **FIGURE 1** des résultats issus du calcul de la fission du plutonium 240 qui résumant schématiquement les principales étapes du phénomène. La série d'images montre l'évolution au cours du temps des densités de matière (protons et neutrons) obtenues par notre approche. Elles correspondent à différentes formes caractéristiques du noyau, de la déformation initiale jusqu'à la fragmentation.

Comme tout noyau qui fissionne, de manière spontanée ou induite par une particule le heurtant, le plutonium 240 possède une déformation notable dans son état initial (état 1). Au fur et à mesure qu'il s'allonge, il commence par acquérir une forme de poire (état 3) qui laisse présager que les fragments obtenus ne seront pas identiques. Cette tendance s'accroît à partir du « point selle » (état 4) qui est un point de non-retour, correspondant à l'allongement à partir duquel le processus devient irréversible et

la probabilité de fissionner est égale à 1. Avec l'apparition des fragments (état 5), une zone centrale se dessine, moins large, caractérisée par une densité de neutrons et protons plus faible. Cette zone s'affine de plus en plus jusqu'à la séparation des fragments (état 7) suivie de leur accélération (état 9).

Dans notre exemple de la fission du plutonium 240 qui se fragmente en un noyau de molybdène 106 et un noyau de tellure 134, la génération des formes autour de la séparation (état 7) et après (états 8 et 9) a été obtenue pour la première fois dans notre méthode microscopique grâce à notre nouvelle approche. Les propriétés des fragments ainsi obtenues (ou qui en découlent) sont ensuite exploitées pour générer les propriétés des particules qu'ils émettent.

RÉFÉRENCES

- 1 — **P. Carpentier, N. Pillet, D. Lacroix, N. Dubray, D. Regnier** « Construction of continuous collective energy landscapes for large amplitude nuclear many-body problems », *Phys. Rev. Lett.*, **133**, 152501 (2024).
- 2 — **P. Carpentier** *Microscopic and dynamical description of the fission process including intrinsic excitations*, thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay soutenue le 27 septembre 2024.



Une surprise de taille dans la forme des noyaux du fermium

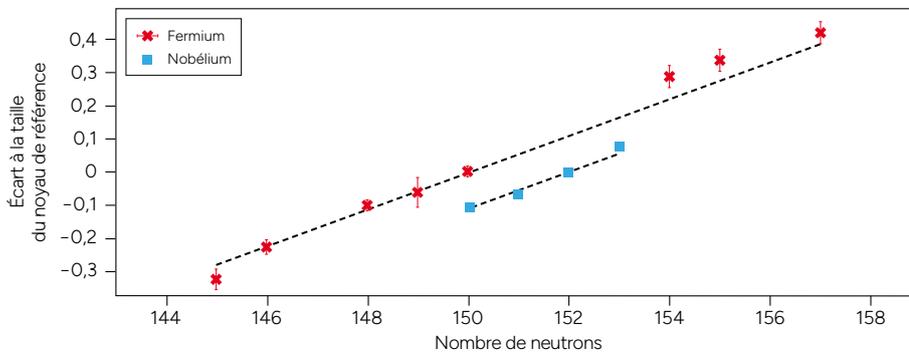
Les physiciens nucléaires utilisent la mesure de la taille du noyau de l'atome pour connaître sa forme. Pour des noyaux très lourds, mesurer ou calculer cette taille est un défi. C'est pourtant ce qui a été réalisé récemment [1]. Dans cette étude, des prévisions théoriques réalisées au CEA - DAM ont remis en cause le changement de forme qui était attendu pour des isotopes du fermium.

Depuis plusieurs années, le CEA-DAM réalise sur supercalculateur des prévisions théoriques de l'état ou du comportement de tout noyau atomique. Par exemple pour savoir ce que produit une collision entre une particule légère et un noyau lourd. Les méthodes employées sont robustes, car fondées sur la résolution d'équations fondamentales de la mécanique quantique. De ce fait, elles sont considérées comme prédictives, car dépourvues de paramètres ajustables. Dans les cas où l'expérience est réalisable, un accord entre la prévision et la mesure a maintes fois

été vérifié. Cela renforce la confiance dans la prévision théorique des noyaux qui ne sont pas accessibles à l'expérience. Pour le programme Simulation du CEA-DAM, l'évaluation de données nucléaires s'appuie sur ces prévisions en complément des expériences réalisées.

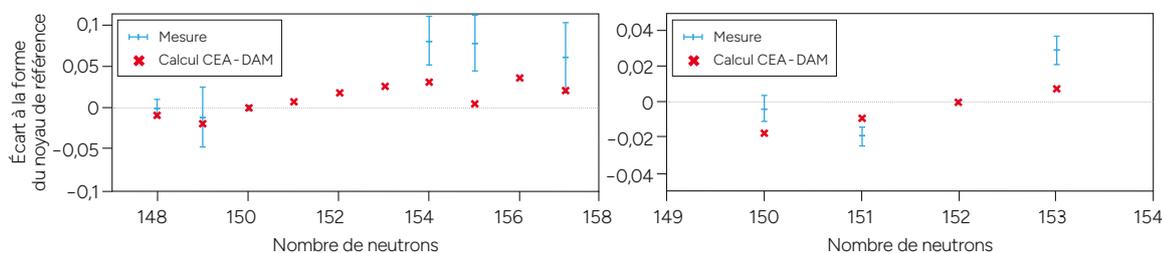
Une des premières propriétés que le calcul théorique prévoit est la forme du noyau et on sait que si celle-ci n'est pas la bonne, alors les autres propriétés ne seront pas fiables. Cela est évident pour la fission nucléaire. En effet, ce processus continu de déformation du noyau démarre à partir de sa forme initiale

FIGURE 1



→ En fonction du nombre de neutrons, variation mesurée de la taille des isotopes du fermium (en rouge) et du nobélium (en bleu), relative à celle du fermium à 150 neutrons et à celle du nobélium à 152 neutrons respectivement. Les droites en pointillé correspondent à la forme du noyau de référence dont la taille varie par homothétie en fonction du nombre de neutrons. Pour les isotopes du fermium jusqu'à 150 neutrons et pour ceux du nobélium, la forme du noyau est inchangée. Pour les isotopes du fermium avec 154 neutrons ou plus, les points expérimentaux semblent s'écarter de la droite, ce qui indiquerait un changement de forme. Mais cet écart est faible au regard de l'incertitude de mesure.

FIGURE 2



—> En fonction du nombre de neutrons, comparaison des mesures au calcul CEA-DAM du changement de forme des isotopes du fermium (à gauche) et du nobélium (à droite), relative à celle du fermium à 150 neutrons et à celle du nobélium à 152 neutrons respectivement. Un écart à la droite horizontale est la signature d'un changement de forme du noyau. Pour tous les isotopes du fermium comme pour ceux du nobélium, notre calcul (en rouge) ne prévoit pas de changement de forme ; d'autres laboratoires de référence dans le monde font le même constat. Ce résultat est une surprise pour les isotopes du fermium comportant 154 neutrons et plus, d'autant plus que l'énergie de liaison est bel et bien impactée, comme attendu par l'effet quantique dit effet de couche. L'augmentation du nombre de neutrons n'aurait donc pas un fort impact sur la forme des noyaux.

et aboutit à l'apparition de fragments puis à leur séparation (voir article précédent). Il est donc important de prédire au plus juste la forme des noyaux. Pour la plupart des noyaux d'intérêt, la forme est connue, sphérique ou déformée : ellipse, poire, etc. Pour les noyaux très lourds, par contre, les connaissances sont plus limitées du fait de la rareté des mesures.

Une équipe internationale est parvenue à mesurer la taille des isotopes du fermium et du nobélium [1]. Ces isotopes comportent des nombres de neutrons variables (145 à 155) pour un nombre fixe de protons définissant l'élément fermium (100 protons) et l'élément nobélium (102 protons). Il s'agit de noyaux plus lourds que l'uranium et le plutonium. Dans le cas des isotopes du fermium comportant 154 neutrons ou plus, un effet quantique, dit effet de couche, lié au nombre de neutrons est attendu : l'impact de cet effet a été prédit par le calcul pour l'énergie de liaison de ces isotopes et mis en évidence expérimentalement. Selon l'état actuel des connaissances, cet effet devrait aussi conduire à un changement de forme des noyaux.

Comme on s'y attendait pour les plus faibles nombres de neutrons, la FIGURE 1 montre que la forme est inchangée (les points restent sur la droite). À partir de 154 neutrons, les points mesurés pour les isotopes du fermium s'éloignent de la droite, suggérant un changement de forme. Toutefois, compte tenu des incertitudes de mesure, cet écart est trop faible pour étayer l'effet attendu. En ce qui concerne les isotopes du nobélium, les tailles mesurées sont compatibles avec une forme inchangée, quel que soit le nombre de neutrons.

Pour répondre à la demande des expérimentateurs, le CEA-DAM a effectué les prévisions théoriques de forme et de taille des différents isotopes du fermium et du nobélium étudiés [1]. Le premier constat est que les prévisions et les mesures concordent pour les isotopes du fermium de moins de 154 neutrons et pour ceux du nobélium. Plus surprenantes, nos prévisions pour les isotopes du fermium de 154 neutrons et plus ne prévoient pas de changement de forme (FIGURE 2). D'autres calculs, réalisés à cette occasion dans d'autres laboratoires de référence aux États-Unis, en Allemagne, en France, en Belgique, etc., abondent dans notre sens.

Contrairement à ce qui était attendu pour les isotopes du fermium, l'augmentation du nombre de neutrons à partir de 154 n'aurait pas un fort impact sur la forme des noyaux, alors que l'énergie de liaison est bel et bien impactée. Ce résultat n'était absolument pas intuitif. De nouvelles expériences doivent être imaginées pour fournir de nouveaux points de comparaison. Il serait intéressant aussi que les mêmes investigations soient menées pour d'autres noyaux très lourds.

RÉFÉRENCES

- 1 — J. Warbineck *et al.* « Smooth trends in fermium charge radii and the impact of shell effects », *Nature*, **634**, p. 1075-1079 (2024).



C. Pépin, R. André, F. Occelli, F. Dembele, P. Loubeyre CEA - DAM, centre DAM Île-de-France
A. Mozzanica, V. Hinger Paul Scherrer Institute, Villigen, Suisse
M. Levantino European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble

Comprimer rapidement l'eau liquide retarde sa cristallisation

Lorsqu'une arme entre en fonctionnement, certains métaux deviennent liquides et sont portés à très haute pression. Mais les expériences sont difficiles à mener dans ces conditions ! C'est pour cela que le CEA - DAM étudie un autre liquide sous forte pression : l'eau. Lorsqu'elle est comprimée rapidement, l'eau peut cristalliser en une forme dense et particulière de glace, appelée glace VII. Nous avons comprimé l'eau à des vitesses de compression inédites, révélant les mécanismes de cristallisation que nous pourrions utiliser dans nos modèles [1].

L'eau est un liquide fascinant. Pour la plupart des éléments, le solide est plus dense que le liquide et coule. Pour l'eau, c'est le contraire : la glace est moins dense et flotte sur l'eau liquide. Ce comportement unique découle de la manière dont les molécules d'eau interagissent par une liaison faible, appelée liaison hydrogène. Ce phénomène est essentiel à la vie : la glace forme une couche isolante sur les lacs et les océans, protégeant les écosystèmes aquatiques.

La solidification de l'eau est en réalité encore plus complexe que cela. Sous différentes pressions et températures, l'eau peut adopter au moins dix-neuf phases distinctes de glace. La glace que nous connaissons bien sur Terre a ses atomes d'oxygène et d'hydrogène organisés en motifs hexagonaux. En revanche, la phase de glace la plus répandue dans l'Univers est probablement une forme amorphe de faible densité, sans structure cristalline à grande échelle. Une autre phase particulièrement étudiée est la glace VII, caractérisée par ses motifs cubiques. Cette phase est stable sur une large plage de pressions, allant de 2 à 80 gigapascals (GPa) (20 000 à 800 000 fois la pression atmosphérique), des conditions comparables à celles rencontrées sur des planètes et lunes glacées comme Enceladus, Titan ou Europa. La formation de la glace VII nécessite donc des pressions extrêmes, mais la vitesse de compression joue également un rôle clé, et une question cruciale restait jusque-là sans

réponse : que se passe-t-il si l'eau est comprimée très rapidement, au-delà de sa zone de stabilité ?

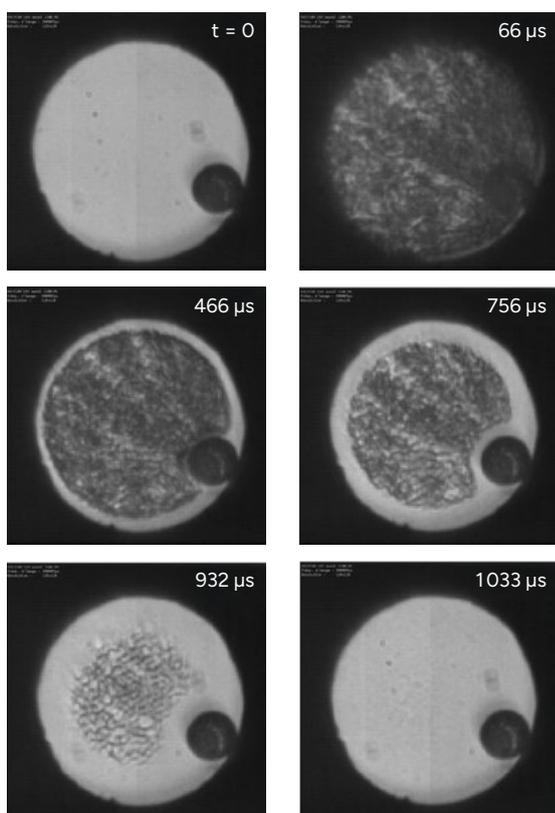
Nous avons mis au point une cellule à enclumes de diamant dite dynamique (d-CED), un dispositif capable d'appliquer de très hautes pressions sur des échelles de temps allant de 0,1 à 100 millisecondes [2], dans le but d'apporter des éléments de réponse à cette question. Pour comprendre comment l'eau cristallise dans ces conditions, la d-CED est couplée à plusieurs techniques d'analyse : la diffraction des rayons X au synchrotron européen à Grenoble (ESRF), qui nous offre des informations sur la position des atomes, l'imagerie optique pour voir ce qui se passe au niveau macroscopique (voir FIGURE 1), et la spectroscopie de luminescence qui mesure la pression. Nous avons aussi collaboré avec le Paul Scherrer Institute (PSI) en Suisse : leur détecteur, capable de capturer jusqu'à seize images de diffraction en seulement 100 microsecondes environ, a permis de suivre en temps réel les transformations structurelles de l'eau. La combinaison de toutes ces technologies a permis de suivre en direct la cristallisation de la glace VII à partir de l'eau liquide.

Cette étude montre que plus la vitesse de compression est élevée, plus la pression nécessaire pour amorcer la cristallisation est élevée. Par exemple, à une vitesse de compression de 110 GPa/ms, l'eau reste liquide jusqu'à près de 2,9 GPa, alors qu'elle cristalliserait bien plus tôt dans des conditions statiques, à 0,98 GPa.

Pour comprendre cette cristallisation de la glace VII à partir de l'eau liquide, il faut revenir à la théorie de la nucléation, vieille de presque 100 ans. Dans cette théorie, la cristallisation démarre à partir d'un petit germe cristallin. Il doit atteindre une taille critique pour que sa croissance devienne favorable sur le plan énergétique. Si le germe est trop petit, il se dissout et disparaît. Cette théorie nous a permis de faire un lien entre un temps caractéristique de nucléation et la pression de l'eau liquide observée. En intégrant des données d'expériences complémentaires issues de la littérature scientifique, nous avons proposé une loi de nucléation globale allant de la seconde à la nanoseconde : nous pouvons prédire le temps de nucléation quelle que soit la vitesse de compression (FIGURE 2).

Tous ces résultats vont pouvoir être intégrés dans les modèles du CEA-DAM de comportement des matériaux en conditions extrêmes. Mais il y a bien d'autres applications possibles ouvertes par la cellule à enclumes de diamant dynamique que nous

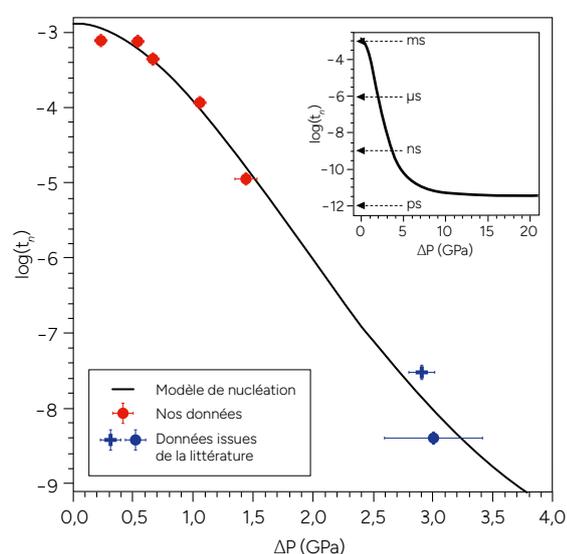
FIGURE 1



→ Cristallisation de l'eau liquide en glace VII filmée avec une caméra ultrarapide. L'eau liquide ($t = 0$) cristallise en masse à $t = 66 \mu\text{s}$. L'aspect sombre vient du fait que la glace cristallise en une poudre très fine avec beaucoup de joints de grain, qui disparaissent progressivement comme on le voit sur les images suivantes.

avons mise au point, combinée avec les nouveaux diagnostics de pointe développés. Ce sont des outils puissants pour explorer les transitions de phase dans les matériaux. Comprendre les cinétiques de transition de phase en compression dynamique pourrait avoir des applications nombreuses en géophysique, en science des matériaux et même dans la recherche sur les exoplanètes. Nous envisageons d'appliquer ces méthodes sur d'autres éléments, comme le gallium ou le bismuth, car eux aussi ont une transition liquide-solide facilement accessible expérimentalement. Objectif : tester une loi de comportement universelle de la cristallisation des liquides loin de leur domaine de stabilité.

FIGURE 2



→ Interprétation des données expérimentales avec un modèle de nucléation développé au CEA-DAM faisant le lien entre le temps de nucléation t_n (en ordonnées, axe logarithmique) et la surcompression de l'eau liquide (en abscisses).

Nous observons que la durée de surfusion (quand l'eau reste liquide alors qu'elle devrait être solide) est plus importante quand la vitesse de compression est élevée.

RÉFÉRENCES

- 1 — C. Pépin, R. André, F. Ocelli, F. Dembele, A. Mozzanica, V. Hinger, M. Levantino, P. Loubeyre « Metastable water at several compression rates and its freezing kinetics into ice VII », *Nature Communications*, 15, p. 8239, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52576-z> (2024).
- 2 — R. André, C. Pépin, F. Ocelli, P. Loubeyre « La cellule à enclumes de diamant en mode dynamique », revue *Focus*, 8, p. 40-41 (2023).



F. Bottin, R. Béjaud, B. Amadon, L. Baguet, M. Torrent CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, Bruyères-le-Châtel

A. Castellano NanoMat/Q-Mat/CESAM et European Theoretical Spectroscopy Facility, Université de Liège, Belgique

J. Bouchet CEA - DES, centre de Cadarache

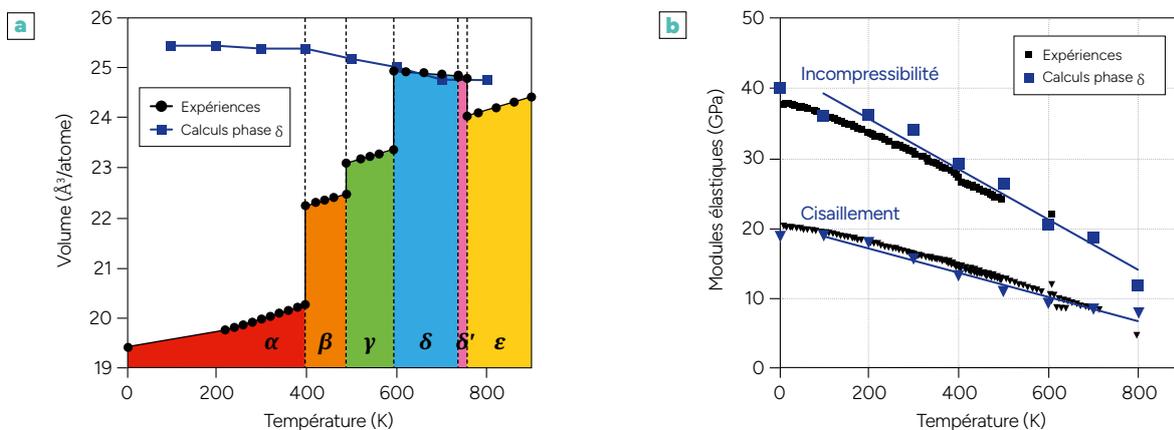
Effets spectaculaires de température dans le plutonium

Une équipe conduite par le CEA - DAM vient de réaliser une première en montrant par la simulation que des effets spectaculaires de température sont à l'œuvre dans le plutonium en phase δ [1]. Ceux-ci conduisent à un effondrement des propriétés élastiques et à une contraction du volume en température. Ces travaux permettent au CEA - DAM d'avoir une compréhension plus précise des propriétés du plutonium et de valider la démarche entreprise depuis une trentaine d'années pour simuler son comportement.

Le plutonium est l'un des matériaux les plus fascinants. Même 80 ans après sa découverte, ce métal continue de poser des défis aux physiciens, théoriciens comme expérimentateurs. Le plutonium présente une succession de six phases cristallographiques différentes en fonction de la température à pression ambiante (voir FIGURE 1a). Parmi elles, la phase δ est la plus utilisée en métallurgie, car elle est

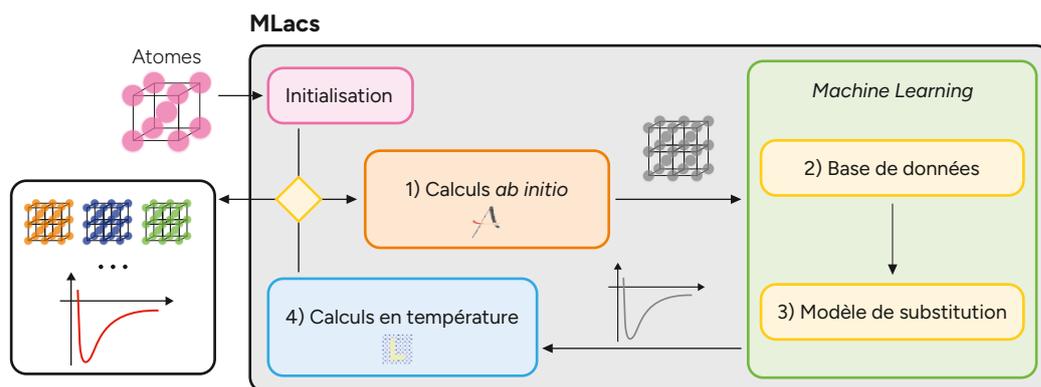
ductile (déformable sans cassure) et est donc la phase la plus étudiée. Sa plage de stabilité en température ($593 \text{ K} \leq T \leq 736 \text{ K}$) est relativement restreinte, mais peut être étendue en ajoutant des éléments chimiques comme le gallium. Cette phase possède des propriétés intrigantes en température, avec entre autres (FIGURE 1) : une surprenante contraction du volume (dilatation thermique négative) et une chute inattendue de la résistance

FIGURE 1



→ Propriétés de la phase δ du plutonium en fonction de la température entre $T = 0$ et 900 K. Les résultats issus des calculs réalisés avec le code MLacs développé au CEA - DAM sont en bleu et ceux issus des nombreuses expériences passées en noir (voir les références dans [1]). [a] Variation expérimentale du volume des différentes phases du plutonium. Seul le volume de la phase δ diminue quand la température augmente. Le calcul avec le code MLacs pour la phase δ reproduit très bien cette diminution de volume. [b] Chute des modules élastiques (incompressibilité et cisaillement) en fonction de la température : l'accord entre expérience et calcul est tout à fait satisfaisant (ici, la plage de stabilité de la phase δ a été étendue pour les mesures en ajoutant du gallium).

FIGURE 2



→ Schéma de fonctionnement du code MLacs (voir aussi les références [2] et [3]) : 1) un calcul *ab initio* est réalisé sur une structure atomique au moyen du code Abinit, 2) les forces et déplacements atomiques obtenus sont ajoutés à une base de données, 3) un modèle de substitution est ajusté sur cette base, 4) une simulation en température est effectuée avec ce modèle au moyen du code LAMMPS, puis une configuration atomique est extraite de ce calcul et est envoyée à 1). Cette boucle infinie est interrompue lorsque certaines propriétés *ab initio* ont convergé. On dispose alors en sortie de la base de données et du modèle de substitution.

à la compression et au cisaillement (forte réduction des modules élastiques).

Au-delà de ces aspects liés à la structure du réseau atomique, le plutonium présente aussi des variations importantes de sa structure électronique. En effet, ses électrons se répartissent à l'intérieur du réseau atomique en se localisant ou se délocalisant, ce qui favorise l'apparition de phases cristallographiques (FIGURE 1a) à grands volumes (p. ex. : δ) ou petits volumes (p. ex. : α). Ainsi, décrire toutes les phases du plutonium au moyen d'un même formalisme nécessite de traiter les électrons et les noyaux sur un pied d'égalité. Cela peut être fait au moyen de simulations numériques dites *ab initio* qui permettent de décrire les interactions entre électrons (quelques milliers) et les noyaux (quelques centaines) au moyen de la physique quantique. Cependant, ces simulations sont extrêmement gourmandes en ressources de calcul dans le cas du plutonium et exigeraient des années de calcul avec des milliers de processeurs sur le supercalculateur Exa du CEA-DAM pour obtenir un résultat à une seule température.

C'est la raison pour laquelle nous avons développé un code nommé MLacs (*Machine Learning Assisted Canonical Sampling*, voir FIGURE 2) permettant d'accélérer grandement les simulations *ab initio*. En s'appuyant sur des outils d'apprentissage automatique (*Machine Learning*) [2], MLacs remplace le modèle *ab initio* très coûteux par un modèle de substitution qui l'est beaucoup moins et divise par cent le coût de calcul. En démontrant la fiabilité de cette procédure sur de nombreux systèmes [3], nous avons montré que MLacs était capable de reproduire les résultats *ab initio* avec la même précision. Ce gain en temps et en ressources nous a permis d'effectuer des calculs sur le plutonium et d'obtenir un grand nombre de résultats avec un haut niveau de détail [1].

En particulier, la variation de volume qui a été prédite par cette méthode (FIGURE 1a) est négative sur l'ensemble de la gamme de température ($0 \text{ K} \leq T \leq 800 \text{ K}$) avec un très bon accord avec

l'expérience sur la plage de stabilité de la phase δ ($593 \text{ K} \leq T \leq 736 \text{ K}$). Sur la FIGURE 1b, la baisse des modules d'incompressibilité et de cisaillement respectivement est en excellent accord avec les données expérimentales. Ces deux résultats, ainsi que d'autres présentés dans l'article [1], sont extrêmement importants pour le CEA-DAM. D'une part, aucune équipe internationale n'avait jamais obtenu ces propriétés du plutonium par la simulation. D'autre part, ils valident la stratégie entreprise depuis de nombreuses années par le CEA-DAM pour décrire précisément le plutonium par la simulation.

Ces travaux ouvrent la voie à l'étude des autres phases du plutonium et à la description de la phase δ alliée au gallium. Concernant ce dernier point, des études sont en cours et montrent que la réduction (ou l'augmentation) de volume en température est fortement dépendante de la concentration d'alliage. Par ailleurs, l'utilisation du code MLacs permettra d'obtenir de nombreuses autres grandeurs thermodynamiques du plutonium comme cela a été fait récemment pour l'or au CEA-DAM [4].

RÉFÉRENCES

- 1 — F. Bottin, R. Béjaud, B. Amadon, L. Baguet, M. Torrent, A. Castellano, J. Bouchet « Huge anharmonic effects in delta plutonium », *Phys. Rev. B*, **109**, L060304, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.109.L060304> (2024).
- 2 — Collectif du CEA - DAM Apprentissage automatique - Intelligence artificielle, revue *Chocs*, **54**, 96 pages (2024).
- 3 — A. Castellano, F. Bottin, J. Bouchet, A. Levitt, G. Stoltz « *Ab initio* canonical sampling based on variational inference », *Phys. Rev. B*, **106**, L161110, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.106.L161110> (2022).
- 4 — P. Richard, A. Castellano, R. Béjaud, L. Baguet, J. Bouchet, G. Geneste, F. Bottin « *Ab initio* phase diagram of gold in extreme conditions », *Phys. Rev. Lett.*, **131**, 206101, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.131.206101> (2023).



F. Soubiran CEA-DAM, centre DAM Île-de-France
M. Preising, M. French, R. Redmer Universität Rostock, Rostock, Allemagne
C. Mankovich California Institute of Technology, Pasadena, États-Unis

Exploration de l'intérieur de Saturne avec des simulations atomiques

Des simulations numériques à l'échelle atomique (dites *ab initio*) ont permis de mieux appréhender la structure interne de la planète Saturne [1]. Ces résultats permettent au CEA-DAM de mieux comprendre le comportement de la matière dans des conditions extrêmes de température et de pression.

La description de la matière dans des conditions simultanées de haute pression (un million d'atmosphères) et de températures de l'ordre de 10 000 K est délicate tant numériquement qu'expérimentalement. Pour les simulations numériques, les processus physiques mis en jeu sont complexes et font intervenir des phénomènes quantiques, ce qui implique des simulations numériques à l'échelle atomique, coûteuses en ressources de calcul. Du point de vue expérimental, les limitations technologiques ne nous permettent pas d'atteindre simultanément ces conditions. À défaut d'expériences en laboratoire, Saturne, sixième planète du Système solaire et géante gazeuse, offre un laboratoire naturel.

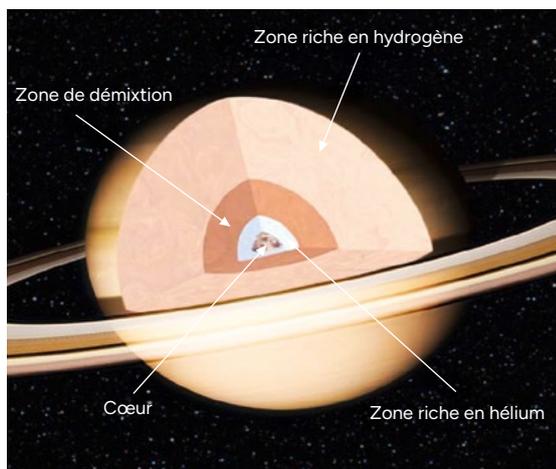
En effet, différentes sondes spatiales ayant exploré Saturne ont mis en évidence le caractère unique de cette planète. Les survols par *Pioneer 11*, *Voyager 1* et *2* et par *Cassini* ont permis d'observer un champ magnétique spécifique. Un champ magnétique apparaît avec le mouvement d'un fluide conducteur à l'intérieur de la planète. Nos simulations numériques ont pour but de déterminer une cartographie des propriétés physiques de la matière à l'intérieur de Saturne, en nous basant sur les derniers modèles astrophysiques. Elles permettent de mieux comprendre sa structure interne. Des simulations magnétohydrodynamiques permettent ensuite de comprendre la génération du champ magnétique [1].

Structure interne de Saturne

Les modèles de formation de planète suggèrent que Saturne s'est constituée par accrétion d'éléments solides sur une période de quelques millions d'années, jusqu'à atteindre une masse d'environ dix fois celle de la Terre. Cette masse critique a permis à la planète d'attirer rapidement le gaz environnant. Cette enveloppe gazeuse, principalement composée d'hydrogène et d'hélium, devrait avoir une composition proche de celle dite de la nébuleuse protosolaire, avec environ 27,5 % de sa masse en hélium. Cependant, les mesures prises par la sonde *Cassini* montrent une concentration bien inférieure, oscillant entre 4 et 13 % dans les couches externes. Cela suggère que des processus internes ont redistribué l'hélium vers les couches profondes de la planète, une hypothèse confirmée par les études gravitationnelles qui estiment la distribution de la masse à l'intérieur de Saturne.

D'un point de vue microscopique, cette séparation hydrogène-hélium se comprend assez bien. À haute pression, l'hydrogène prend une forme métallique. En revanche, l'hélium, dans les mêmes conditions, inhibe fortement la conduction électrique. Cette différence de comportement conduit à la séparation progressive de l'hélium et de l'hydrogène, par un processus de démixtion, semblable à l'incapacité de l'huile et de l'eau à se mélanger. Une fois séparé de l'hydrogène,

FIGURE 1



→ Structure interne de Saturne issue de nos simulations. La zone de démixture est estimée s'étendre entre 20 000 et 30 000 km de distance au centre. Une zone contenant 95 % d'hélium en masse se situe entre la zone de démixture et le cœur de Saturne. Au-delà de la zone de démixture (> 30 000 km), la couche externe est riche en hydrogène, d'abord métallique (< 45 000 km) puis moléculaire.

l'hélium, plus dense, se sédimente vers les couches internes, où sa concentration atteint alors 95 % (voir FIGURE 1), en deçà de la zone de démixture. Cette évolution de la concentration en fonction de la profondeur a un impact majeur sur les propriétés physiques locales.

Une zone riche en hélium

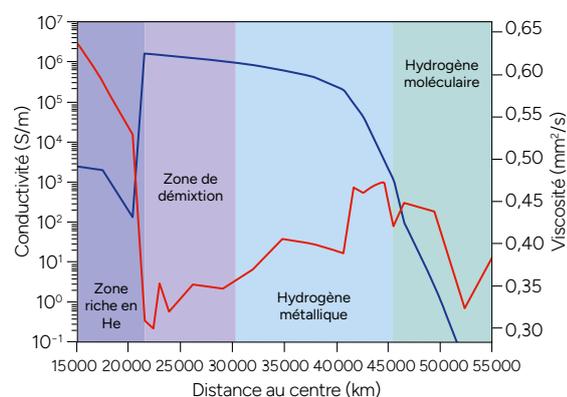
Les simulations ont permis de calculer la conductivité électrique et la viscosité de l'enveloppe de Saturne à différentes profondeurs. Ces deux grandeurs sont primordiales pour déterminer un modèle du champ magnétique de Saturne. Une planète ne peut avoir de champ magnétique que s'il existe une zone interne constituée d'un fluide conducteur en mouvement convectif et ayant un flot turbulent. La grandeur conductivité électrique nous permet de caractériser le caractère conducteur du fluide. La grandeur viscosité pilote la dynamique du fluide. Plus la viscosité est faible, plus le mouvement convectif est aisé et plus la turbulence peut se développer, ce qui facilite la génération d'un champ magnétique.

En revanche, en deçà de la zone de démixture se trouve une épaisse zone riche en hélium, où la conductivité électrique diminue fortement et la viscosité augmente nettement. Cela inhibe la turbulence du fluide (voir FIGURE 2). Il est donc peu probable qu'un champ magnétique puisse être généré efficacement dans cette région. La zone de génération du champ magnétique semble donc se

limiter à la région composée de la zone de démixture et de la couche externe d'hydrogène métallique (située entre 20 000 et 45 000 km, voir FIGURE 1), avec une zone faiblement conductrice en deçà, ce qui est spécifique de cette planète. Il est probable que cette structure unique soit à l'origine de la nature du champ magnétique de Saturne.

Le développement de simulations magnétohydrodynamiques, se basant sur les données calculées dans notre étude, permettra de mieux caractériser le lien entre cette distribution de l'hélium et la génération du champ magnétique. La combinaison de mesures astrophysiques, de modèles physiques et de calculs à l'échelle atomique permet ainsi de mieux comprendre les propriétés de la matière dans des conditions extrêmes ainsi que la relation entre l'échelle microscopique (atomique) et les propriétés macroscopiques.

FIGURE 2



→ Évolution simulée de la conductivité (bleu) et de la viscosité cinématique (rouge) en fonction de la distance au centre de la planète. La zone riche en hélium présente une faible conductivité électrique et une viscosité plus élevée que le reste de l'enveloppe. Ces propriétés sont défavorables à la génération d'un champ magnétique dans cette zone. Nos simulations montrent que la conductivité et la viscosité sont faibles dans les régions externes, car l'hydrogène y est sous forme moléculaire et peu dense. Dans la zone de démixture où l'hydrogène devient métallique, la conductivité augmente significativement tandis que la viscosité reste presque inchangée. C'est à partir de cette profondeur que l'on s'attend à la génération du champ magnétique.

RÉFÉRENCES

- 1 — M. Preising, M. French, C. Mankovich, F. Soubiran, R. Redmer « Material properties of Saturn's interior from ab initio simulations », *Astrophysical Journal Supplement Series*, **269**, p. 47 (2023).



A.-L. Adenot-Engelvin CEA - DAM, centre du Ripault

A. Zekhnini, G. Delette CEA - DES, Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Liten), Grenoble

O. Isnard Institut Néel du CNRS, Grenoble

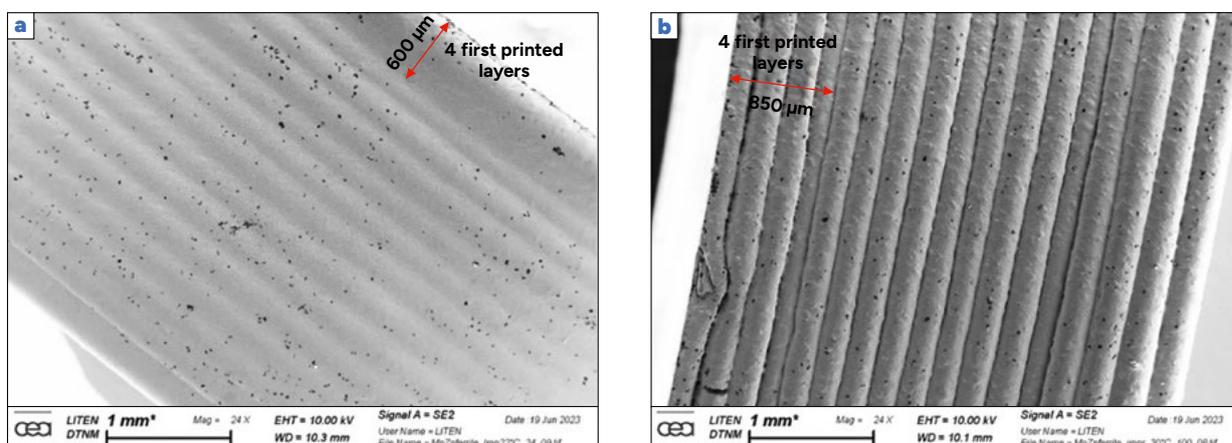
Impression 3D de ferrites pour l'électronique de puissance

Une équipe de chercheurs du CEA - DAM et du CEA - Liten a développé une nouvelle méthode de fabrication de pièces toriques en ferrite pour l'électronique de puissance [1,2]. Ce procédé dit de robocasting relève de l'impression 3D, appelée aussi fabrication additive. Il a permis d'obtenir une géométrie de la pièce torique qui n'était pas réalisable avec le procédé de pressage traditionnel. Grâce à cette géométrie, les pertes en puissance ont été réduites.

Les besoins de conversion d'énergie électrique connaissent actuellement une forte demande, liée à de nouvelles applications dans les véhicules électriques et les centres de données (*data centers*). Cette conversion, basée sur des dispositifs d'électronique de puissance, requiert des pièces

toriques de ferrites de composition chimique ($MnZn$) Fe_2O_4 présentant des propriétés magnétiques optimales, habituellement réalisées par pressage et frittage. Cependant, les applications émergentes exigent un effort de miniaturisation des composants et d'adaptation des géométries que la fabrication additive rendrait

FIGURE 1



→ Observation de la tranche d'un échantillon de ferrite $(MnZn)Fe_2O_4$ obtenu par impression 3D à une température de plateau [a] de 22 °C, en dessous de la température de gélification de la pâte, et [b] de 30 °C, au-dessus de la température de gélification. Les premières couches imprimées à 30 °C sont mieux définies géométriquement, ce qui démontre une meilleure maîtrise de la fabrication.

accessible, alors qu'un procédé de pressage traditionnel ne le permet pas. Un procédé de fabrication additive ou d'impression 3D construit, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique [3]. La fabrication additive est considérée par le CEA-DAM comme un accélérateur d'innovation dans le domaine des matériaux. En effet, elle libère certaines contraintes des procédés traditionnels pour atteindre des propriétés multiples et des formes souvent complexes, ce qui ouvre de nouvelles possibilités en matière de conception et de réalisation de pièces.

FIGURE 2



→ Photographies de tores en ferrite $(\text{MnZn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ mis en forme (à gauche) par impression 3D et (à droite) par pressage. L'impression 3D donne accès à des géométries inaccessibles au procédé traditionnel et conduit ici à une limitation des pertes de puissance magnétique.

Parmi les procédés d'impression 3D de pièces toriques de ferrites, la micro-extrusion de pâte a retenu l'attention des chercheurs du CEA pour sa facilité de mise en œuvre. Ce procédé se déroule en plusieurs étapes : tout d'abord, une pâte est formulée et homogénéisée en mélangeant 50 % en volume de poudre commerciale de ferrite, 40 % d'eau et 10 % de polymères. La pâte est ensuite extrudée à travers une buse sur un plateau mobile à une pression contrôlée exercée par un piston. Après impression 3D, l'eau et les polymères sont éliminés de la pièce par traitement thermique. Enfin, un cycle thermique de frittage est effectué pour densifier la pièce.

L'étape clé du procédé réside dans la préparation de la pâte, dont la viscosité doit être suffisamment faible pour permettre l'extrusion de la pâte et suffisamment élevée pour éviter la déformation de la pièce après impression. Dans la formulation de la

pâte mise au point dans cette étude, les polymères sélectionnés, une fois dissous dans l'eau, forment des hydrogels dont la viscosité dépend également de la température. La composition de la pâte a été choisie de façon à ce que sa température de gélification soit de 25 °C. Cette propriété permet de réaliser des géométries mieux contrôlées en ajustant la température du plateau d'impression au-dessus de cette température, comme le montre la FIGURE 1. De plus, la pâte a l'avantage de comporter des constituants respectueux de l'environnement.

Pour limiter les pertes de puissance dans une pièce torique, l'épaisseur du tore doit être réduite. Grâce au procédé d'impression 3D, nous sommes parvenus à fabriquer un tore d'épaisseur égale à 1 mm seulement ; avec le procédé traditionnel, cette épaisseur ne pouvait être inférieure à 3 mm (FIGURE 2). Ainsi, mesurées sur des tores imprimés plutôt que pressés, les pertes en puissance dues à une dissipation d'énergie magnétique sous forme de chaleur sont réduites de 20 % grâce à cette méthode d'élaboration très prometteuse.

À l'échelle de la microstructure, nous avons vérifié que la porosité et la taille des grains d'un ferrite pressé et de celles d'un ferrite imprimé sont sensiblement identiques. Pour cela, nous avons optimisé les paramètres du procédé pour conserver les propriétés magnétiques du matériau.

Cette avancée technologique notable au service de l'électronique de puissance est transposable à d'autres compositions de ferrites et à d'autres matériaux céramiques ou métalliques. Elle sera maintenant exploitée dans le cadre d'un nouveau projet collaboratif utilisant la co-impression de deux matériaux pour créer des géométries multimatériaux complexes, offrant de nouvelles opportunités de transfert aux industriels du secteur.

RÉFÉRENCES

- 1 — **A. Zekhnini** *Élaboration de ferrites spinelles par impression 3D pour applications à haute fréquence*, thèse financée par le programme transverse de compétences (PTC) du CEA FOCUS économie circulaire, soutenue le 7 avril 2025 à l'université Grenoble-Alpes.
- 2 — **A. Zekhnini, G. Delette, A.-L. Adenot-Engelvin, O. Isnard** « Manufacturing and performances of MnZn ferrite cores with thin walls prepared by paste material extrusion 3D printing », *Additive Manufacturing*, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104389> (2024).
- 3 — **Collectif du CEA-DAM** « Vers une ingénierie numérique des matériaux », revue *chocs*, **51**, p. 69-93 (2021).



A. Saintonge, Y. Le Petitcorps Laboratoire des composites thermostrocturaux (LCTS), UMR 5801
J. Braun, S. Beaudet-Savignat, T. Piquero CEA - DAM, centre du Ripault
A. Allemand CEA - DAM, centre du Cesta

Quel matériau pour protéger les engins spatiaux lors de la rentrée atmosphérique ?

Concevoir l'enveloppe qui entoure et protège les systèmes de communication des véhicules spatiaux est un casse-tête. C'est surtout vrai pour le radôme, une zone spécifique qui doit assurer à la fois la protection thermique et la transmission des ondes électromagnétiques. Non seulement ce radôme doit résister à des températures élevées, supérieures à 1500 °C, mais il doit aussi être léger, résistant aux chocs et à l'oxydation, et laisser passer les ondes électromagnétiques pour communiquer. Nous avons mis au point un procédé pour fabriquer un matériau composite à base d'aluminosilicate de baryum (BAS) capable de répondre à ces exigences [1].

Lors d'un décollage ou d'une rentrée atmosphérique, les engins spatiaux doivent être protégés des échauffements extrêmes de l'enveloppe externe: l'électronique dans l'objet spatial ne supporte pas les hautes températures. Il est alors nécessaire d'utiliser des matériaux supportant plus de 1000 °C, donc à haut point de fusion ($T > 1500$ °C), tout en étant légers. De nombreuses céramiques répondent à ces critères. Mais ces matériaux sont fragiles et peuvent se casser de manière brutale. Pour pallier ce problème, les matériaux dits composites ont été développés. Ils sont constitués de renforts intégrés dans une matrice. Par exemple, le béton armé est un composite, composé d'une armature métallique (le renfort) dans le béton (la matrice).

Nous avons opté pour des composites à matrice céramique (CMC), dans lesquels à la fois la matrice et le renfort sont constitués de matériaux céramiques. À l'heure actuelle, les CMC sont déjà couramment employés dans les disques de frein des avions ou les tuyères des

fusées. Ils sont amenés à se démocratiser dans les années à venir *via* leur utilisation dans les moteurs d'avion et dans le nucléaire. Les fibres utilisées comme renforts, dix fois plus fines qu'un cheveu, améliorent la tenue mécanique du matériau, qui résiste mieux à la déformation et à la rupture que la matrice seule. À condition de bien ajuster la liaison entre la fibre et la matrice: une liaison trop forte annule le bénéfice des fibres (le matériau reste fragile), tandis qu'une liaison trop faible nuit à la cohésion du matériau.

Plusieurs matrices et fibres sont envisageables pour des CMC. Lesquelles choisir? Les critères sont stricts: le radôme doit laisser passer les ondes électromagnétiques, mais aussi conserver ses propriétés mécaniques en température, résister à l'oxydation et être un isolant thermique. Pour les fibres, les oxydes, par exemple de silicium ou d'aluminium, remplissent ces critères et sont donc des candidats de choix. Parmi celles disponibles commercialement, celle d'alumine (Al_2O_3) présente les meilleures propriétés mécaniques, mais pour une utilisation en

dessous de 1300 °C. Pour le matériau de matrice, nous avons choisi le BAS ou aluminosilicate de baryum ($\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), pour sa température de fusion et ses bonnes propriétés électromagnétiques [2].

Cependant, le BAS existe sous plusieurs phases cristallines, mais une seule est compatible avec les fibres, la phase hexagonale, uniquement stable à haute température (au-delà de 1600 °C). Les fibres, elles, ne sont utilisables que jusqu'à 1300 °C. Comment faire ? Nous avons montré, lors de précédents travaux de thèse, que l'ajout de carbonate de rubidium au BAS permettait de stabiliser cette phase à plus basse température, rendant compatible l'utilisation des fibres d'alumine [3].

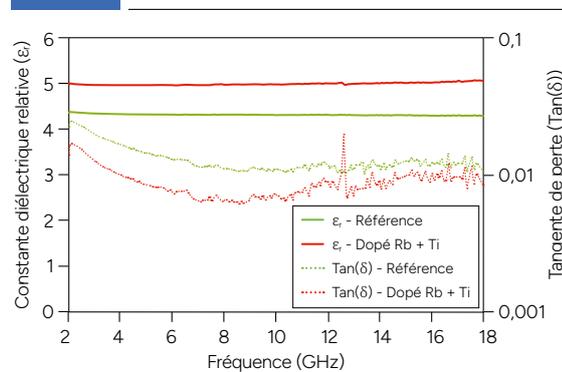
Un autre défi intervient également à cette température : le matériau ne se densifie pas suffisamment, c'est-à-dire qu'il contient trop de porosités et possède donc de mauvaises propriétés mécaniques. L'ajout de dioxyde de titane permet de rendre ce composite plus dense : après une heure de traitement thermique à 1300 °C, la densité atteint 75 %, contre seulement 65 % sans ajout de dioxyde de titane. L'analyse de la microstructure après traitement à 1300 °C pendant 1 h avec les éléments chimiques rubidium et titane (FIGURE 1) montre que la taille de grain reste similaire, qu'il n'y a pas de grossissement granulaire excessif, pouvant être préjudiciable aux propriétés mécaniques, et que la phase hexagonale est toujours présente.

Reste à vérifier les propriétés de notre matériau vis-à-vis des ondes électromagnétiques. Nous avons mesuré les propriétés diélectriques, décrivant le comportement du matériau soumis à un champ électromagnétique, sur une gamme de fréquences de 2 à 18 GHz sur la matrice de BAS avec et sans ajout de rubidium et de titane [4]. Les deux paramètres clés mesurés sont la constante diélectrique, traduisant la manière dont un matériau répond à un champ

électrique (comparativement au vide), et la tangente de perte, qui indique la dissipation du signal électromagnétique dans ce dernier sous forme de chaleur. Tous deux doivent être les plus faibles possible. Notre matériau répond aux critères souhaités pour un radôme : la constante diélectrique relative est inférieure à 5 et la tangente de perte est inférieure à 0,01 (FIGURE 2).

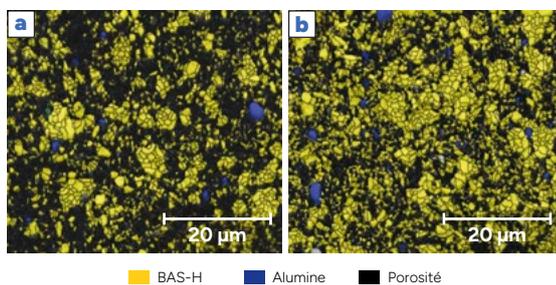
Ces résultats permettent de considérer la phase hexagonale du BAS comme la matrice de composites idéale pour des applications de rentrée atmosphérique perméable aux ondes électromagnétiques et permettant de garantir les performances de communication.

FIGURE 2



→ Propriétés diélectriques en fonction de la fréquence d'une matrice BAS hexagonale densifiée à 1300 °C pendant 1 h, de référence (en vert) et avec ajout des éléments chimiques rubidium et de titane (en rouge). La constante diélectrique relative ϵ_r (trait plein) est stable en fonction de la fréquence. L'augmentation par rapport à la référence est due à l'augmentation de la densité, mais reste inférieure à la valeur maximale de 5 compatible avec un radôme. Au contraire, la tangente de perte $\tan(\delta)$ (en pointillé) diminue lorsque la densité augmente, car il y a moins d'interfaces dans le matériau : les dissipations thermiques sous forme de chaleur sont donc réduites.

FIGURE 1



→ Taille de grain et structure cristallographique mesurées par diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD pour Electron BackScattered Diffraction) [a] après traitement à 1300 °C pendant 1 h sur le matériau de référence et [b] avec ajout de rubidium et de titane. L'EBSD permet de déterminer les phases cristallines en présence. L'ajout de rubidium et de titane augmente la densité (les zones noires sont moins nombreuses), sans modifier la phase hexagonale du BAS (en jaune). Les autres phases du BAS ne sont pas détectées. L'alumine résiduelle, provenant du procédé de fabrication, est visible en bleu.

RÉFÉRENCES

- 1 — A. Saintonge, J. Braun, J. Danet, A. Allemand, T. Piquero, S. Beudet-Savignat, Y. Le Petitcorps « Lowering hexacelsian sintering temperature with additives: solid or liquid phase mechanisms », *Journal of the European Ceramic Society*, **44**(10), p. 5938-5956, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.03.026> (2024).
- 2 — C. Guérin, A. Saintonge, Y. Le Petitcorps, A. Allemand, T. Piquero, A. Maitre, R. Boulesteix « Un nouveau matériau de protection thermique transparent aux ondes », revue *Avancées*, **18**, p. 30-31 (2024).
- 3 — R. Billard *Mise au point d'un composite à fibre oxyde et matrice d'aluminosilicate de baryum modifiée*, thèse de doctorat de l'université de Bordeaux soutenue le 15 décembre 2015.
- 4 — A. Saintonge *Élaboration d'un composite oxyde/oxyde à matrice d'aluminosilicate de baryum et fibres d'alumine*, thèse de doctorat de l'université de Bordeaux soutenue le 12 novembre 2024.

P. Hébert, S. Riboulet, E. Bouton, J. Morand CEA - DAM, centre du Ripault
 A. Sollier CEA - DAM, centre DAM Île-de-France
 Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire matière en conditions extrêmes (LMCE), Bruyères-le-Châtel

Un générateur de chocs compact pour caractériser les explosifs

Étudier le comportement sous choc des explosifs en minimisant la quantité de matière utilisée est un défi aux enjeux importants pour le CEA - DAM. Une de ses équipes a relevé ce défi en développant un générateur de chocs polyvalent qui nécessite cent fois moins de matière que les générateurs de chocs habituels [1,2]. Il est aussi un outil précieux pour le développement de nouveaux détonateurs.

L'une des premières étapes du fonctionnement d'une arme nucléaire consiste à générer un choc bref et intense sur un explosif pour le faire détoner. Bien connaître le comportement de l'explosif sous l'effet d'un tel choc est primordial pour simuler le fonctionnement de l'arme.

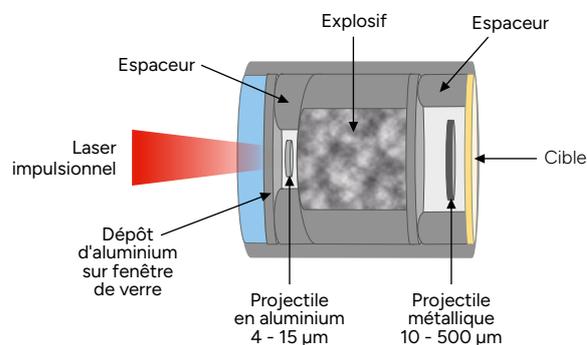
Pour acquérir des données expérimentales, on génère habituellement des chocs en utilisant des canons qui sont conçus pour lancer des projectiles sur des cibles de grandes dimensions. Ces expériences nécessitent des équipes nombreuses et de grandes installations ainsi qu'une quantité importante de matière (plusieurs grammes). Cela devient réhhibitoire lors du développement d'un nouvel explosif pour lequel la quantité de matière disponible est limitée.

Le CEA-DAM a développé une solution alternative pour miniaturiser les essais : le générateur GCopy pour Générateur de Chocs Opto-PYrotechnique génère des petits projectiles de dimensions millimétriques, ce qui permet de travailler avec des cibles constituées d'une petite quantité de matière – quelques dizaines de milligrammes. Un autre avantage de ce dispositif est qu'il peut être exploité par une ou deux personnes dans une petite installation.

Le principe de fonctionnement à deux étages du GCopy est décrit sur la FIGURE 1. Un laser délivrant des impulsions de quelques nanosecondes est focalisé sur

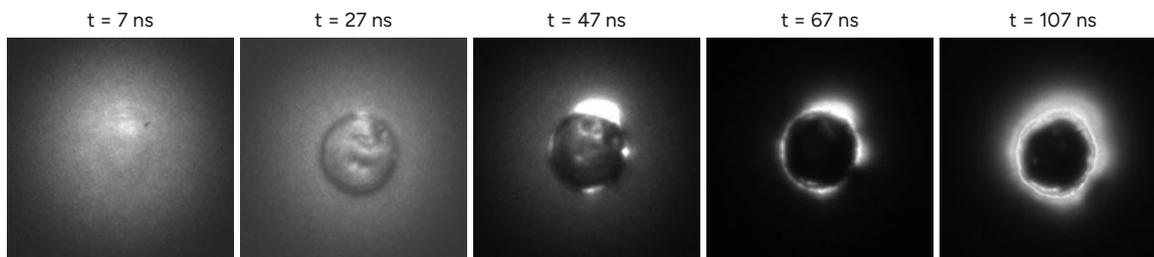
un substrat de verre recouvert d'une couche d'aluminium de quelques microns d'épaisseur. Le choc généré accélère un projectile d'aluminium placé derrière le substrat de verre. Ce projectile atteint des vitesses supérieures à 10000 kilomètres par heure au bout de quelques

FIGURE 1



→ Schéma de fonctionnement du GCopy (Générateur de Chocs Opto-PYrotechnique). C'est un générateur de chocs à deux étages. Le premier étage permet d'accélérer un projectile d'aluminium de quelques microns d'épaisseur à l'aide d'un laser impulsif. Ce projectile déclenche le deuxième étage en faisant détoner un explosif, ce qui permet de propulser un projectile de quelques centaines de microns d'épaisseur sur l'explosif cible à étudier (voir le texte pour plus de détails).

FIGURE 2



—> Images d'un projectile d'aluminium volant à 12 000 km/h à différents instants au cours de son vol. La dernière correspond à l'instant d'impact sur l'explosif. Nous constatons la très bonne planéité du projectile et sa parfaite intégrité.

centaines de microns de vol seulement. Son impact sur un explosif fait détoner ce dernier. La détonation accélère un second projectile (métallique) bien plus épais, jusqu'à 500 microns d'épaisseur, qui génère sur la cible le choc recherché.

Le GCOPY permet d'atteindre des pressions supérieures à 50 gigapascals, soit 500 000 fois la pression atmosphérique, pour des durées allant jusqu'à 200 nanosecondes. Ces valeurs permettent l'utilisation de cibles de quelques centaines de microns d'épaisseur, représentatives du matériau dans son ensemble avec une atténuation très faible de l'onde de choc.

Grâce à l'association de techniques de pointe pour mesurer la vitesse, la pression ou la température et de caméras offrant des résolutions spatiales et temporelles élevées, il est possible de déterminer des propriétés clés des explosifs. Par exemple, nous pouvons calculer la courbe d'Hugoniot d'un tel matériau, qui décrit la relation entre la pression de choc et la vitesse de la matière [1]. Nous pouvons également mesurer la température sous choc du matériau [3]. Ces informations sont essentielles pour déterminer l'équation d'état complète du matériau, qui permet de prédire son comportement en conditions d'utilisation.

Le GCOPY est également un outil précieux pour concevoir de nouveaux détonateurs. En effet, il permet de déterminer la pression de choc à partir de laquelle un explosif détone en fonction de la durée du choc. C'est ce que l'on appelle la courbe critique d'amorçage. Pour cela, il suffit de faire varier la vitesse du projectile et son épaisseur. Avec le GCOPY, il est même possible de faire varier le diamètre des projectiles, paramètre influençant le seuil d'amorçage de l'explosif.

Pour que les résultats soient fiables, il est important de connaître la forme du projectile au moment de l'impact sur l'explosif (un disque avant impact). On recherche une intégrité et une planéité parfaites. La FIGURE 2 présente les images d'un projectile d'aluminium à différents instants de vol, la dernière correspondant à l'instant d'impact sur l'explosif. Nous constatons la très bonne planéité du projectile et sa parfaite intégrité.

Grâce à sa polyvalence, le GCOPY permettra de progresser rapidement dans la connaissance du comportement sous choc des explosifs et dans la conception de nouveaux détonateurs.

RÉFÉRENCES

- 1 — A. Sollier, P. Hébert, E. Lescoute, P. Lafourcade « Hugoniot measurements of the 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene (TATB) formulation T2 up to 70 GPa », *J. Appl. Phys.*, **135**, 095901 (2024).
- 2 — P. Hébert, S. Riboulet, É. Bouton, A. Sollier « Laser slapper detonator for shock compression study of energetic materials », *AIP Conf. Proc.*, **2844**, 290004 (2023).
- 3 — P. Hébert, J. Rideau, M. Doucet, É. Bouton « Temperature measurements of a shocked TATB-based explosive using Raman spectroscopy », *proc. of the 16th International Detonation Symposium*, Cambridge, États-Unis, p. 481-488 (2018).



J. A. Don Jayamanne*, **R. Outerovitch**, **F. Ballanger**, **J. Bénier**, **E. Blanco**, **J. Tailleur**, **A. Hervouët**, **P. Gandeboëuf**, **J.-R. Burie**

CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

O. Durand CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire matière en conditions extrêmes (LMCE), Bruyères-le-Châtel

C. Chauvin, **P. Hereil** CEA - DAM, centre de Gramat

R. Pierrat, **R. Carminati** Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, Paris

R. Carminati Institut d'optique Graduate School, Université Paris-Saclay, Palaiseau

Mieux comprendre la formation d'un nuage de particules sous choc grâce à la lumière

Lors de l'interaction d'une onde de choc avec les défauts de surface d'un métal, un nuage de particules est éjecté à grande vitesse. Ces particules peuvent perturber fortement le fonctionnement d'expériences comme celles réalisées sur le Laser Mégajoule. Pour mieux caractériser les processus physiques responsables de leur formation et de leur propagation, le nuage est éclairé avec un faisceau laser et le signal réfléchi est analysé. Une collaboration entre le CEA - DAM et l'Institut Langevin à Paris a modélisé l'interaction lumière-particules. Ce travail a permis de mieux comprendre les expériences d'éjection de matière sous choc et d'améliorer les modèles développés pour les restituer [1].

Lorsqu'une onde de choc traverse un échantillon métallique, elle interagit avec sa surface, au contact du milieu environnant, vide ou gaz. Cette surface, dite libre, n'est jamais parfaitement plane. Elle comporte toujours des défauts géométriques se présentant souvent sous la forme de rainures sinusoïdales ou triangulaires (FIGURE 1), issues par exemple d'opérations mécaniques d'usinage ou de polissage. La profondeur des défauts est de l'ordre de quelques microns et leur largeur de quelques dizaines de microns.

L'interaction du choc avec un défaut provoque son inversion géométrique. Par exemple, dans le cas d'un défaut triangulaire, le creux de la rainure en retrait de la surface libre passe devant celle-ci. En outre, si l'intensité du choc est suffisamment importante, le métal peut fondre sous l'action de l'onde de choc, soit directement, soit après que celle-ci a rebondi sur la surface libre. L'inversion géométrique de chaque défaut se traduit alors par l'éjection d'une nappe de métal liquide à très grande vitesse (plusieurs milliers de kilomètres par heure). Chaque nappe se développe, s'étire et finit par se

fragmenter en de multiples particules, appelées éjecta (FIGURE 1).

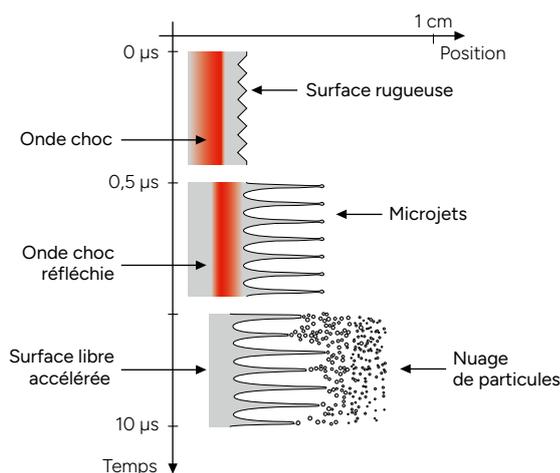
Comprendre et simuler l'ensemble des processus physiques conduisant à la formation de ces éjecta est un défi pour les physiciens, qui souhaitent connaître l'évolution avec le temps du rayon et de la vitesse des éjecta.

Pour cela, nous éclairons le nuage d'éjecta au moyen d'un faisceau laser et nous recueillons l'énergie lumineuse qu'ils rétrodiffusent, qui est analysée par une technique d'interférométrie optique. Le principe de mesure est celui des radars : lorsque le faisceau laser interagit avec un objet en mouvement, il revient avec une fréquence légèrement décalée, due au décalage Doppler, proportionnelle à la vitesse de l'objet. Un résultat de mesure, obtenu grâce à la sonde du CEA - DAM, est représenté sous la forme d'un spectrogramme (FIGURE 2), permettant de visualiser l'évolution en fonction du temps de la vitesse des éjecta et de la surface libre.

Pour déterminer les propriétés du nuage, nous nous aidons de la simulation numérique. La principale difficulté provient du fait qu'il n'est pas possible d'y

* Actuellement à Physics and Astronomy, University of Exeter, Exeter, Royaume-Uni.

FIGURE 1

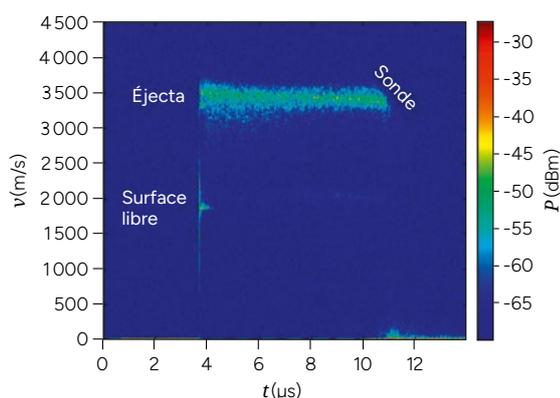


→ Illustration du mécanisme de micro-éjection dans une expérience typique d'éjection sous choc. Lorsqu'elle atteint la surface libre, l'onde de choc entre d'abord en contact avec le fond des rainures orientées vers l'intérieur. Elle rebondit ensuite sur la surface libre et les rainures deviennent des microjets (ou des nappes en deux dimensions) de métal liquide orientés vers l'avant de la surface libre (vers l'extérieur). Les microjets s'étirent jusqu'à ce que la tension de surface du métal ne suffise plus à assurer leur cohésion. Ils se fragmentent alors, produisant un nuage d'éjecta.

remonter de manière univoque à partir d'une seule mesure, car des hypothèses différentes peuvent aboutir à des spectrogrammes similaires [2]. Grâce à une modélisation de l'interaction de la lumière avec les éjecta et de son transport dans le nuage, l'équipe formée de membres du CEA-DAM et de l'Institut Langevin a permis de corriger certaines hypothèses et d'accroître la confiance dans nos modèles d'éjection.

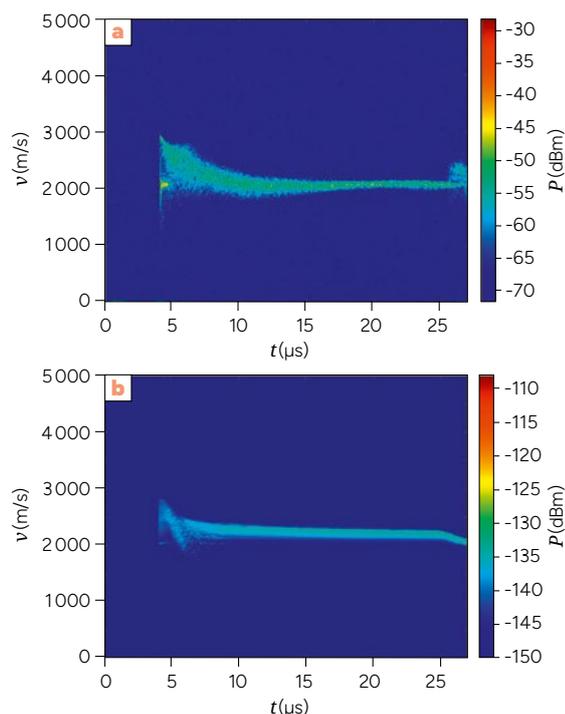
Jusqu'à présent, les physiciens postulaient que la densité de répartition spatiale des particules était

FIGURE 2



→ Spectrogramme expérimental obtenu lors d'une expérience de mise sous choc d'un échantillon d'étain en contact avec le vide. La surface libre de l'échantillon d'étain comporte à sa surface des rainures triangulaires de profondeur 8 μm et de période 25 μm. À partir de l'instant $t_0 = 4 \mu s$, la sonde de vélocimétrie hétérodyne détecte la surface libre de l'échantillon qui se déplace à une vitesse d'environ 1800 m/s, ainsi que le nuage d'éjecta situé devant, en vol balistique à des vitesses autour de 3500 m/s. L'axe P indique la puissance en dB-m du signal lumineux rétrodiffusé par les particules.

FIGURE 3



→ [a] Spectrogramme expérimental dans l'air. Le nuage d'éjecta est créé vers $t = 4 \mu s$. Le front d'éjecta est fortement ralenti et subit de la fragmentation dans l'air non choqué jusqu'à $t = 10 \mu s$. De $t = 10$ à $t = 20 \mu s$, les particules les plus lentes retombent dans l'air choqué et sont réaccélérées. De $t = 20$ à $t = 27 \mu s$, toutes les particules semblent se déplacer à la même vitesse que celle de la surface libre. [b] Spectrogramme simulé dans l'air en bon accord avec le spectrogramme expérimental.

faible. Le flux lumineux n'interagit alors qu'une seule fois avec le nuage avant d'en ressortir (on parle de diffusion simple). L'étude a au contraire mis en évidence la prédominance des effets de multidiffusion de la lumière dans certaines zones du nuage [3]. Une autre hypothèse consistait à considérer que le nombre de particules du nuage ayant un rayon α variait selon une loi de puissance. À partir d'expériences d'éjection de matière sous chocs réalisées avec du gaz, l'étude a démontré [1] que cette loi était incomplète, et qu'elle devait plutôt obéir à une loi de distribution de type log-normale. La FIGURE 3 montre un bon accord entre l'expérience et la simulation.

RÉFÉRENCES

- [1] J. A. Don Jayamanne, R. Outerovitch, F. Ballanger, J. Bénier, E. Blanco, C. Chauvin, P. Hereil, J. Tailleux, O. Durand, R. Pierrat, R. Carminati, A. Hervouët, P. Gandeboeuf, J.-R. Burie « Recovering particle velocity and size distributions in ejecta with photon Doppler velocimetry », *J. Appl. Phys.*, **136**.8, 083111 (2024).
- [2] W. T. Buttler, R. J. R. Williams, F. M. Najjar « Foreword to the special issue on ejecta », *J. Dyn. Behav. Mater.*, **3**.2, p. 151-155 (2017).
- [3] J. A. Don Jayamanne, J.-R. Burie, O. Durand, R. Pierrat, R. Carminati « Characterization of ejecta in shock experiments with multiple light scattering », *J. Appl. Phys.*, Cambridge, **135**.7, 073105 (2024).

Laser Mégajoule : tout est prêt pour étudier l'effet mécanique du choc laser sur le porte-cible

Les expériences menées sur le Laser Mégajoule permettent d'atteindre des conditions expérimentales extrêmes. Ces conditions s'accompagnent de contraintes mécaniques sévères sur le bras robotisé portant la cible des expériences, qui peuvent endommager ou même casser sa structure. Le CEA - DAM souhaite étudier cette contrainte et ses effets pour *in fine* dimensionner au mieux les pièces concernées et leur assurer une plus longue vie. Pour réaliser ces études, nous avons d'une part identifié une installation laser de taille réduite et de grande souplesse et d'autre part mis au point et validé une méthode pour reproduire le bon niveau de contrainte mécanique occasionnée sur le Laser Mégajoule [1].

Le Laser Mégajoule, situé en périphérie de Bordeaux, a été conçu pour réaliser des expériences visant à atteindre la fusion nucléaire en focalisant 176 faisceaux laser sur une cible. Au cours de ces expériences, un bras robotisé (FIGURE 1), appelé porte-cible, est utilisé pour maintenir les cibles de quelques millimètres de diamètre au milieu de la chambre d'expériences, qui mesure dix mètres de diamètre. Lors d'un tir laser, le porte-cible est soumis à de fortes contraintes, températures et vibrations, qu'il est important de caractériser et surtout de maîtriser au mieux pour *in fine* dimensionner les pièces constitutives du bras et lui assurer la plus grande durée de vie.

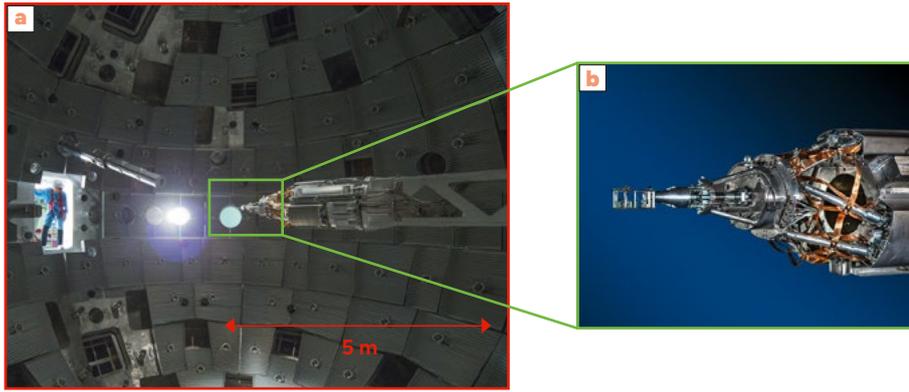
L'intensité et les effets d'une collision dépendent de nombreux facteurs, et des études paramétriques sont nécessaires avec un grand nombre de tirs laser et diverses configurations expérimentales. Il est ainsi commode de recourir à une installation plus souple et plus disponible que le Laser Mégajoule pour faciliter ces études paramétriques. L'installation identifiée est la plateforme Hera, située au Laboratoire d'utilisation des lasers intenses (Luli), à l'École polytechnique. Cette plateforme expérimentale

délivre mille fois moins d'énergie que le Laser Mégajoule. Et pourtant, grâce à ses caractéristiques couplées à une technique de choc confiné que nous avons mise au point, la plateforme permet de construire des expériences dans lesquelles la quantité de mouvement produite est proche de celle développée au Laser Mégajoule.

Pour nous en assurer, les expériences menées ont consisté à tirer sur un pendule et à en mesurer la vitesse et le balancier. En effet, ces données couplées aux caractéristiques du pendule telles que sa masse et son centre de gravité permettent de déduire précisément la quantité de mouvement transmise au matériau servant de cible lors d'une expérience laser (FIGURE 2).

Pour compenser l'énergie du laser, plus faible que celle du Laser Mégajoule, le principe appliqué dans les expériences repose sur le choc laser confiné qui est présenté sur la FIGURE 3. Une impulsion laser de durée égale à quelques nanosecondes avec une énergie allant de quelques millijoules à plusieurs centaines de joules est concentrée à la surface d'un matériau. Si l'énergie déposée est suffisante, un plasma se forme et se propage vers l'arrière dans l'air. En réponse à ce

FIGURE 1



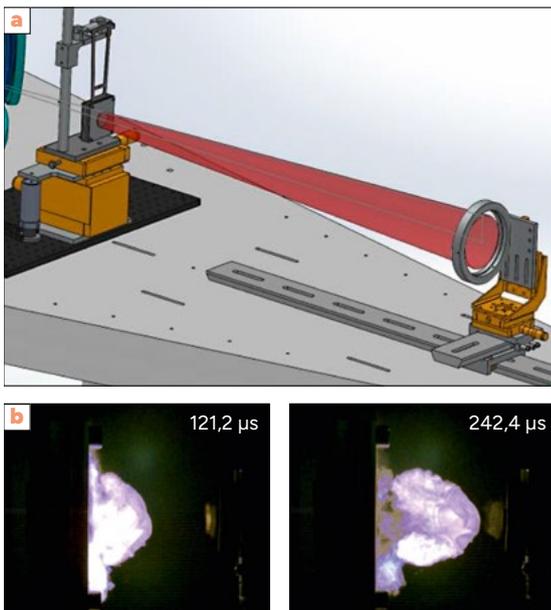
→ [a] Photographie de la chambre d'expériences de dix mètres de diamètre, la partie située à l'intérieur de la chambre du bras robotisé constituant le porte-cible est visible. [b] Zoom sur l'extrémité du porte-cible qui maintient les cibles des expériences de fusion nucléaire (voir aussi les photos dans l'article à la page 10). Différentes pièces du porte-cible doivent être choisies et dimensionnées pour encaisser au mieux des contraintes mécaniques sévères occasionnées par l'absorption de l'énergie laser dans la cible.

phénomène, dit effet fusée, une onde de choc s'établit et se propage dans le matériau; la quantité de mouvement produite n'est cependant pas suffisante dans ce cas. Afin d'augmenter l'effet, on recouvre la surface du pendule d'un polymère transparent au rayonnement laser. Le polymère empêche le plasma formé de se dissiper dans l'air en le confinant à la surface de la cible (FIGURE 3) [2], ce qui a pour effet d'accroître d'un facteur 100 la pression de l'onde de choc produite et d'augmenter sa durée d'application.

Les expériences sur la plateforme Hera ont ainsi montré des valeurs de la quantité de mouvement

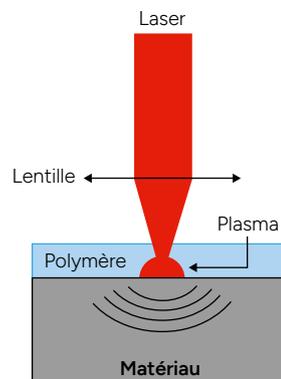
transmise à la cible proches de celles constatées auprès du Laser Mégajoule [1]. Cela permet ainsi d'envisager l'utilisation de cette technique pour étudier le vieillissement du porte-cible du Laser Mégajoule au fur et à mesure des expériences réalisées et de valider les pièces susceptibles d'y être intégrées ultérieurement.

FIGURE 2



→ [a] Schéma de l'expérience sur laquelle est positionné (à gauche) un pendule dont on connaît les caractéristiques mécaniques (dimensions, masse, etc.). Le laser (en rouge) est focalisé par une lentille jusqu'à la cible portée par ce pendule. [b] Images de la surface de la cible lors du tir laser montrant la création du plasma puis sa propagation dans l'air.

FIGURE 3



→ Schéma de principe du choc laser sur un matériau servant de cible. Ici, le laser est focalisé à la surface de la cible pour créer un plasma et produire une onde de choc qui se propage dans le matériau. Pour confiner le plasma, un polymère est déposé sur la surface de la cible. Le polymère bloque l'expansion du plasma et a pour effet d'augmenter la pression produite ainsi que sa durée d'application. Avec ce confinement, la mise en mouvement de la cible est maximisée: sa quantité de mouvement se rapproche des valeurs typiques observées sur certains composants du porte-cible du Laser Mégajoule.

RÉFÉRENCES

- 1 C. Le Bras, E. Lescoute, J.-M. Chevalier, G. Boutoux, D. Hébert « Impulse coupling enhancement of aluminum targets under laser irradiation in a soft polymer confined geometry », *Journal of Applied Physics*, **136** (11), 115106, doi:10.1063/5.0225973 (2024).
- 2 N. C. Anderholm « Laser-generated stress waves », *Applied Physics Letters*, **16** (3), p. 113-115 (1970).

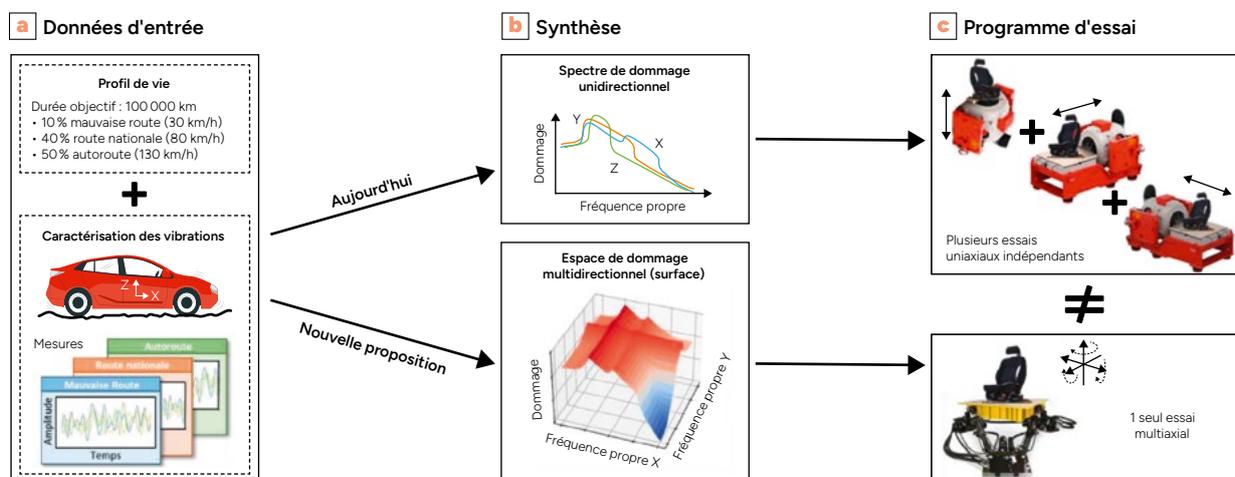
Vers des essais mécaniques multidirectionnels

Les armes nucléaires ou leurs composants subissent des vibrations au cours de leur vie. La représentativité des essais vibratoires réalisés pour la garantie de leur tenue mécanique est un enjeu primordial pour le CEA - DAM. Nous avons mis au point une nouvelle méthode [1] qui permet d'optimiser la définition des éléments de structuration, notamment le rapport de la masse à la tenue aux environnements mécaniques, ainsi que les coûts et les délais.

Pretons l'exemple d'une voiture. Le constructeur doit garantir une durée d'emploi, sans défaillance. Cette durée est souvent de plusieurs années, par exemple trois ans (ou 100000 km). Cette voiture subit diverses vibrations mécaniques pendant sa vie (FIGURE 1). Les amplitudes et les durées de ces vibrations sont différentes pour chaque situation d'emploi: mauvaise route, autoroute, nid-de-poule, virage, etc. On parle de profil de vie. Dans la plupart des cas, les vibrations se produisent dans toutes

les directions de l'espace simultanément. Ces vibrations peuvent endommager certaines pièces de la voiture par fatigue des structures. Pour des raisons évidentes de coûts et délais, l'enjeu pour le constructeur est de garantir la durée d'emploi tout en limitant les tests de la résistance du véhicule à un éventail restreint de situations. Cette étape conduit à spécifier seulement quelques épreuves de courte durée (quelques heures) représentatives du profil de vie. Ces épreuves sont ensuite réalisées sur un moyen d'essais mécaniques.

FIGURE 1



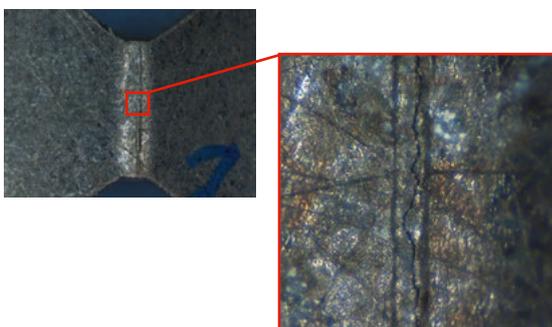
→ [a] Illustration du profil de vie pour un véhicule, c'est-à-dire des épreuves que subit chacun de ses équipements au cours du temps; des mesures de leurs conséquences sont faites. [b] Types d'épreuves unidirectionnelles ou multidirectionnelles choisies pour garantir la durée d'emploi par le constructeur, pour qui elles représentent les épreuves subies au cours de sa vie. [c] Moyens d'essais.

Une équipe du Cesta a proposé une méthode novatrice pour définir un ensemble d'épreuves plus représentatif du profil de vie. En effet, il n'existait jusque-là aucune méthode prenant en compte les conséquences des aspects proprement multidirectionnels d'une excitation sur l'endommagement en fatigue d'une structure. Notre méthode permet d'identifier le point faible de la structure étudiée tout en réduisant la durée d'essai [1]. Elle fournit les informations nécessaires pour tester la structure sur un vibreur multidirectionnel et valider la chaîne de calcul.

Actuellement, à la DAM, les moyens d'essais reproduisent des excitations unidirectionnelles. Ils s'effectuent sur chacun des axes principaux de la structure, indépendamment des autres. Pour établir un programme d'essais, les informations du profil de vie de l'objet sont compilées avec des mesures enregistrées en situation, pour construire des courbes de dommage dans chaque direction. Les effets des interactions éventuelles entre les axes de vibration (couplage, corrélation) sont négligés. Les vibrations s'effectuent dans le programme d'essai successivement axe par axe, en basculant de 90° soit le vibreur, soit la structure pour solliciter l'axe souhaité.

Dans l'article [1], nous montrons que suivant le type de structure ou la combinaison des amplitudes vibratoires, les essais réalisés successivement axe par axe ne sont pas totalement représentatifs de la réalité. D'une part, la durée d'essais conduisant à une défaillance (fissure de fatigue) peut être plus courte en combinant les axes. D'autre part, quand les vibrations sont appliquées seulement suivant certains axes et que le point sensible de la structure ne se situe pas dans cet axe, l'essai ne permet pas de l'identifier correctement. Le CEA-DAM prend en compte

FIGURE 2



→ Cliché d'une éprouvette en acier pliée, sollicitée dynamiquement sur le moyen de vibration multidirectionnel de l'Insa Lyon pour l'évaluation de la nouvelle méthode. L'agrandissement (à droite) permet de visualiser la fissure de fatigue (verticale et au centre) à laquelle les essais ont abouti. Les essais multidirectionnels reflètent mieux la réalité que les essais unidirectionnels et permettent de garantir une durée d'emploi en limitant les coûts et les délais.

ces incertitudes en appliquant des marges à l'amplitude des vibrations uniaxiales. Ces marges peuvent conduire à une définition non optimale.

Dans le cadre de la méthode novatrice que nous avons développée, des travaux ont été réalisés en collaboration avec l'Insa de Lyon sur le moyen multidirectionnel dont ils disposent. Ils ont fait l'objet d'une thèse de doctorat et ont permis de valider la méthode proposée sur éprouvettes (FIGURE 2).

La méthode est une généralisation de celles existant pour les vibrations mécaniques uniaxiales [2] appliquée aux chargements aléatoires multidirectionnels. On s'intéresse non plus à la réponse d'un système à un degré de liberté (une translation par axe), mais à la réponse d'un système à plusieurs degrés de liberté (trois translations et trois rotations). Cette méthode conduit à générer un « espace de dommage » multidirectionnel en fonction des fréquences critiques (résonance) du système (FIGURE 1). Cet espace de dommage est une représentation de tout l'endommagement accumulé durant la vie de la structure. À partir de cet espace, on est capable de reconstruire une vibration multiaxiale unique. Cette vibration inclut les termes de corrélation entre les différents axes, c'est-à-dire la manière dont ils interagissent lorsqu'ils sont sollicités simultanément. La durée d'application des vibrations est ensuite choisie en fonction des exigences du projet [3] et de caractéristiques spécifiques liées à la résistance en fatigue du matériau le plus sollicité dans la structure.

Cette nouvelle méthode permet à la fois d'améliorer la conception, c'est-à-dire d'optimiser le rapport poids à résistance aux environnements mécaniques, les coûts et les délais des phases de développement. Elle intéresse les spécificateurs d'essais vibratoires dans le domaine militaire (Airbus Defense and Space, MBDA, DGA, KNDS, Thales, etc.) ou civil (automobile, ferroviaire, spatial, génie civil, énergie, équipements sportifs, etc.). La prochaine étape, pour la DAM, sera l'acquisition d'un moyen d'essai multiaxial permettant l'application de ces méthodes et la réalisation d'essais plus représentatifs.

RÉFÉRENCES

- 1 — M. Aimé, A. Banvillet et al. « A framework proposal for new multiaxial fatigue damage and extreme response spectra in random vibrations frequency analysis », *Mechanical Systems and Signal Processing*, **213**, 111338 (2024).
- 2 — AFNOR NFX50-144-3, *Démonstration de la tenue aux environnements - Conception et réalisation des essais en environnement - Application de la démarche de personnalisation en environnement mécanique* (2019).
- 3 — M. Aimé et al. « Multiaxial test-tailored vibration specifications: process overview », *proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 9-11 septembre 2024, Louvain, Belgique (2024).

C. Caillaud CEA - DAM, centre du Cesta
 E. Martini, G. Lehnasch, P. Jordan Institut Pprime, UP 3346 CNRS – École nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique (ISAE-ENSMA)
 O. Schmidt Department of Mechanical and Aerospace Engineering, university of California San Diego, La Jolla, États-Unis

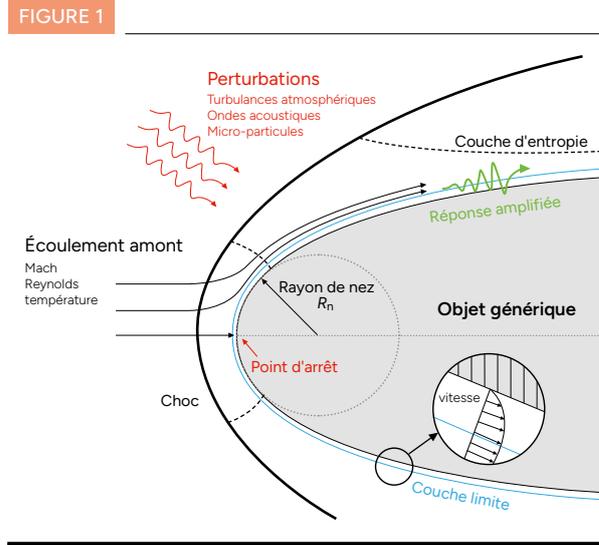
Transition à la turbulence en régime hypersonique : comment modéliser les pointes avant des véhicules spatiaux ?

L'accès à l'espace implique la traversée de l'atmosphère terrestre. Une rentrée hypersonique est éprouvante, le frottement des véhicules sur l'air induisant une ablation de ses couches de protection thermique. Pour en limiter les effets, il faut limiter les flux de chaleur pariétaux. Dans les phases denses de l'atmosphère, une couche limite se forme autour du véhicule. Elle est d'abord laminaire et les molécules d'air y suivent la géométrie de la paroi. Lors de la descente, elle évolue vers un état de turbulence développée, le mouvement de ces particules devenant chaotique. Les flux de chaleur pariétaux sont alors plusieurs fois supérieurs à ceux de la couche laminaire. Un processus complexe de transition à la turbulence dimensionne donc le design des protections thermiques. Des chercheurs du CEA - DAM, de l'Institut Pprime et de l'université de San Diego, aux États-Unis, ont entrepris d'en décoder les mécanismes, entrevoyant les raisons d'un phénomène propre aux géométries émoussées, observé depuis plus d'un demi-siècle.

L'objectif principal est alors d'explorer quel est le mécanisme sous-jacent à l'amplification des perturbations près du point d'arrêt, à l'avant des corps arrondis. Pour ce faire, les effets des nombres de Reynolds et de Mach, deux paramètres clés qui influencent le comportement des écoulements, ont été examinés (FIGURE 1). En particulier, les auteurs ont cherché à identifier les tendances associées à ces paramètres et à comprendre comment elles affectent l'amplification des perturbations menant à la turbulence.

Les équations de Navier-Stokes sont l'outil principal pour décrire ces écoulements fortement compressibles. La résolution numérique de ces équations sur un maillage suffisamment fin pour capturer les plus petites structures de turbulence (simulation de haute fidélité constituant une véritable expérimentation numérique et nécessitant des moyens de calcul adéquats) est la première étape de l'étude. L'idée (FIGURE 2) est ensuite de décomposer localement l'écoulement q en la somme d'un écoulement stationnaire q_0 et d'une petite perturbation harmonique q' . La linéarisation des équations de Navier-Stokes au voisinage de q_0 fait apparaître la matrice jacobienne J_{q_0} dont dépend l'évolution de q' . Dans

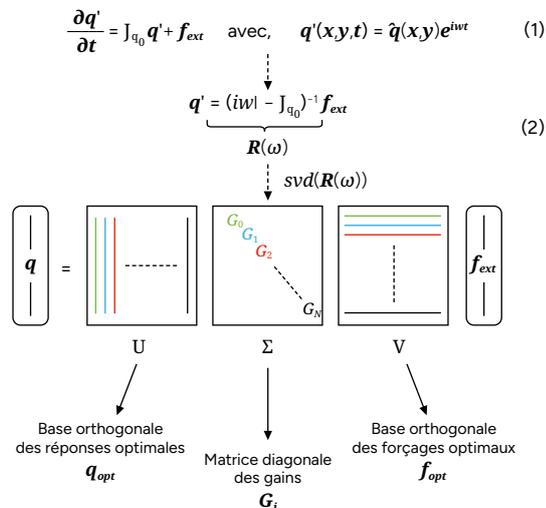
le cas où cette petite perturbation est conditionnée par un forçage instationnaire extérieur f_{ext} de faible amplitude, la transposition de (1) dans l'espace fréquentiel



→ Vue générale de l'écoulement autour d'une pointe avant.

CHOCs AVANCÉES N°19 ————— Juillet 2025

FIGURE 2



→ Illustration de l'analyse entrée-sortie des équations de Navier-Stokes et de la structure de la matrice résolvante associée.

(*éq. 2*) prend la forme d'un système entrée-sortie : le forçage \mathbf{f}_{ext} produit une réponse \mathbf{q}' par action de la fonction de transfert $\mathbf{R}(\omega)$, dite matrice résolvante. Une approche de haute fidélité basée sur l'analyse de la matrice résolvante permet alors de répondre à la question suivante : quelles sont les perturbations \mathbf{f}_{ext} de l'écoulement qui vont causer les réponses \mathbf{q}' d'énergie maximale ?

La décomposition de la résolvante $\mathbf{R}(\omega)$ en valeurs singulières (SVD) permet de déterminer quelles structures pilotent la dynamique de l'écoulement à la fréquence ω . Parmi ces structures, les forçages optimaux \mathbf{f}_{opt} décrivent les supports physiques linéairement indépendants qui peuvent recevoir l'énergie des perturbations extérieures par projection de \mathbf{f}_{ext} , c'est le processus dit de réceptivité. Cette décomposition de la résolvante permet également de déterminer quelles structures, nommées réponses optimales \mathbf{q}_{opt} , sont susceptibles de s'amplifier indépendamment dans l'écoulement. Enfin, l'importance de chacune de ces structures optimales est donnée par les gains optimaux G_i qui leur sont associés. L'amplitude relative de ces gains détermine si un seul ($G_0 \gg G_i$) ou au contraire plusieurs mécanisme(s) domineront la dynamique de l'écoulement.

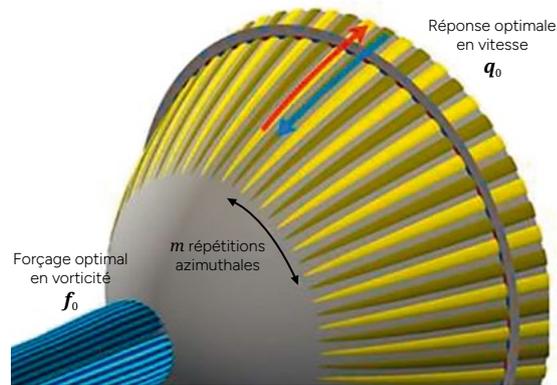
En utilisant cette méthode, nous pouvons prévoir quelles perturbations sont potentiellement les plus problématiques et quelles réponses elles engendrent. Ainsi, l'écoulement a été modélisé autour d'un corps de forme parabolique, simple, mais représentative des corps arrondis. Les simulations ont été réalisées pour une gamme de nombres de Reynolds (de 100 à 300000, basé sur le rayon de la pointe avant) et de nombres de Mach (de 0,3 à 1,2), couvrant ainsi

une large gamme de conditions d'écoulement du régime incompressible à compressible, jusqu'au supersonique.

Les résultats ont révélé que l'amplification maximale des réponses se produit pour des perturbations de fréquence nulle, ce qui suggère que les perturbations de basse fréquence jouent un rôle crucial dans la transition vers la turbulence. En d'autres termes, même de petites fluctuations lentes dans l'écoulement peuvent avoir un impact significatif. Les modes de forçage et de réponse optimaux ont montré un mécanisme de réceptivité associé à la vorticité de l'écoulement libre qui pénètre dans la couche limite près du point d'arrêt et exploite un soulèvement de l'écoulement lent proche de la paroi (*lift-up*) pour créer des structures en stries à la surface du corps (FIGURE 3).

Ces résultats ont des implications importantes pour la conception des véhicules. Comprendre comment les perturbations sont amplifiées autour des corps arrondis permet de mieux prédire la transition vers la turbulence et, par conséquent, d'optimiser la forme des corps pour minimiser la traînée et le transfert de chaleur.

FIGURE 3



→ Vue générale des perturbations optimales tourbillonnaires (bleu) impactant le point d'arrêt pour donner une réponse optimale en vitesse (jaune).

RÉFÉRENCES

- 1 — E. Martini, C. Caillaud, G. Lehnasch, P. Jordan, O. Schmidt « Perturbation amplification near the stagnation point of blunt bodies », *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, **38**, p. 937-951 (2024).
- 2 — E. Martini, O. Schmidt « Linstab2D: stability and resolvent analysis of compressible viscous flows in MATLAB », *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, **38**, p. 665-685 (2024).

A. Gosset, J. Suarez, S. Courtiad CEA - DAM, centre de Gramat
 L. Selle Institut de mécanique des fluides de Toulouse, université de Toulouse, CNRS, Toulouse

CHOC AVANCÉES N°19 ————— Juillet 2025

Au cœur des boules de feu, même les métaux brûlent

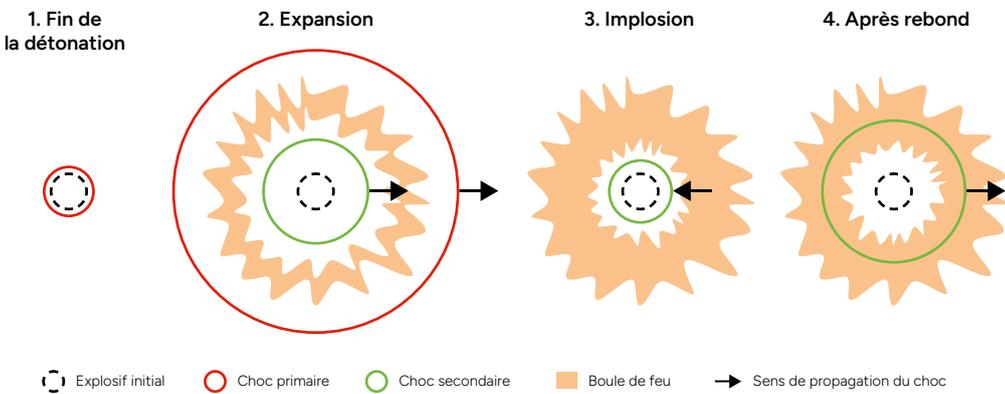
Certains explosifs contiennent des particules d'aluminium afin d'améliorer leurs performances, notamment la puissance du souffle produit. Une équipe du CEA - DAM en collaboration avec l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse s'est intéressée à la combustion de ces particules au sein des boules de feu se formant à la suite de la détonation d'un explosif [1]. Ce phénomène, appelé postcombustion, est encore mal compris bien qu'il joue un rôle majeur dans le dégagement d'énergie de l'explosif. Le modèle numérique proposé, validé sur des configurations académiques, ouvre la voie à des simulations détaillées de ces boules de feu.

La combustion est un phénomène complexe, notamment au sein des explosifs. C'est une réaction chimique entre un oxydant (carburant) et un réducteur (comburant) dégageant très brutalement de la chaleur. La combustion est donc à l'intersection de plusieurs disciplines incluant la chimie, la thermique et la mécanique des fluides. Les métaux aussi peuvent subir une combustion. Ils sont capables de dégager énormément d'énergie par rapport au volume initial de métal à brûler : ils ont une

grande densité énergétique, plus élevée que celle des combustibles comme l'essence. C'est pourquoi depuis de nombreuses années des particules d'aluminium sont ajoutées dans la composition des explosifs afin d'augmenter l'énergie dégagee.

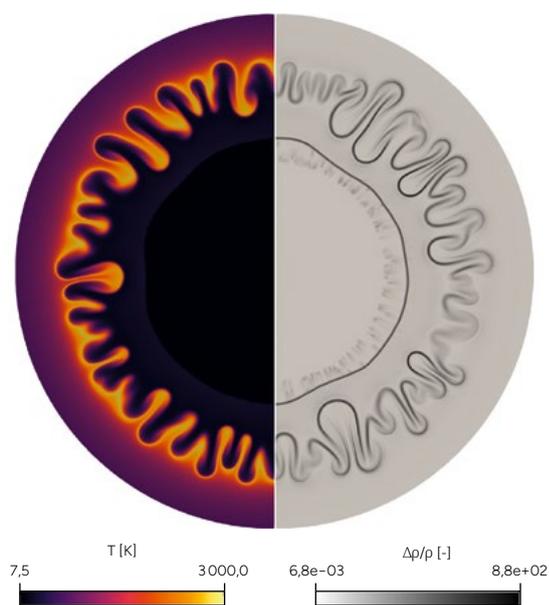
La postcombustion intervient après la détonation de l'explosif. Elle est décrite sur la FIGURE 1 : la détonation libère des gaz et les particules initialement contenues dans l'explosif (étape 1). Comme ces gaz sont chauds et manquent d'oxygène, ils réagissent avec l'oxygène

FIGURE 1



→ Schéma des différentes phases de la postcombustion.

FIGURE 2



→ Simulation de la phase d'implosion. À gauche : température T des gaz. La zone de mélange est visible par sa haute température (en jaune). À droite, le gradient de densité $\Delta\rho/\rho$ permet de visualiser la zone de mélange, mais aussi le choc secondaire (arc de cercle) et la présence des particules derrière le choc (stries causées par la traînée des particules dans le gaz).

de l'air, ce qui crée la boule de feu. Du fait de l'expansion brutale lors de la détonation (étape 2), du vide ainsi qu'un choc secondaire sont créés à l'intérieur de la boule de feu. Cette dépression induit une implosion (étape 3) faisant revenir le choc secondaire et la boule de feu vers le centre. Le choc secondaire rebondit au centre et repart dans l'autre sens, traversant alors la boule de feu (étape 4). Tous ces phénomènes mélangent les produits de détonation avec l'air, ce qui augmente la quantité totale d'énergie dégagée.

L'association de la combustion des gaz chauds avec celle de l'aluminium rend l'étude du souffle complexe. En effet, une boule de feu est opaque, on ne peut donc pas regarder à travers. De plus, les chocs et les températures élevées (de l'ordre de plusieurs milliers de degrés) rendent les mesures difficiles. Numériquement, le défi consiste à effectuer des simulations précises résolvant en même temps la détonation qui se propage en quelques microsecondes et la combustion de l'aluminium qui dure plusieurs millisecondes. De plus, il faut être capable de modéliser la combustion de particules micrométriques dans une boule de feu de plusieurs dizaines de mètres de rayon. Le développement d'un modèle décrivant la combustion des particules d'aluminium au sein d'un code de calcul constitue une avancée

majeure dans la compréhension des mécanismes précédemment décrits. Cela ouvre en effet la voie à la simulation de boules de feu à échelle réelle.

Jusqu'alors, les travaux menés par le CEA-DAM aboutissaient à un modèle précis, mais trop coûteux en temps de calcul [2]. Afin de réduire ces coûts, nous utilisons aujourd'hui des données issues d'une expérience, qui consiste à immobiliser une particule d'aluminium dans un champ magnétique, à la brûler à l'aide d'un laser, et à mesurer les caractéristiques de cette combustion. Cela permet notamment d'accéder à des informations sur la vitesse à laquelle la particule brûle. Nous intégrons ensuite ces données dans les codes de calcul. Grâce à cela, nous obtenons un modèle cohérent avec les modèles précédents, tout en divisant par vingt le temps de calcul.

Dans le cadre de la thèse ayant permis la publication du modèle [3], nous avons réalisé un calcul sur ce qui se passe une dizaine de microsecondes après la détonation d'une charge de TNT contenant des particules d'aluminium, présenté sur la FIGURE 2. Bien qu'étant essentiellement une démonstration des capacités du modèle, les résultats semblent indiquer que la combustion des particules d'aluminium se produit majoritairement lors de la phase d'implosion, quand la boule de feu revient vers le centre de l'explosif. Le modèle développé permettra de fournir des données aux scientifiques calculant le souffle des explosifs. Des perspectives d'amélioration sont à l'étude, notamment pour démarrer la simulation dès la détonation de l'explosif et pour intégrer un modèle d'allumage des particules déjà développé au CEA-DAM [4].

RÉFÉRENCES

- 1 — **A. Gosset, J. Suarez, S. Courtiaud, L. Selle**
« Modeling of micro aluminum particle flames using particle burning time », *Combustion Science and Technology*, **196**(13), p. 2104-2127 (2024).
- 2 — **J. Suarez** *Modélisation de la combustion diphasique de l'aluminium et application sur la post-combustion d'une charge d'explosif condensé dans l'air*, thèse de doctorat de l'université de Toulouse, soutenue le 30 septembre 2020.
- 3 — **A. Gosset** *Numerical modeling of aluminum combustion in hot, high pressure gases*, thèse de doctorat de l'université de Toulouse, soutenue le 17 janvier 2024.
- 4 — **G. Baudin, M. Genetier, T. Elia, L. Catoire**
« Aluminum powder heat and combustion modeling inside the detonation products of high explosives », *proc. 16th International Detonation Symposium*, p. 1410-1419 (2020).

Laser Mégajoule : une méthode pour simuler la propagation des faisceaux

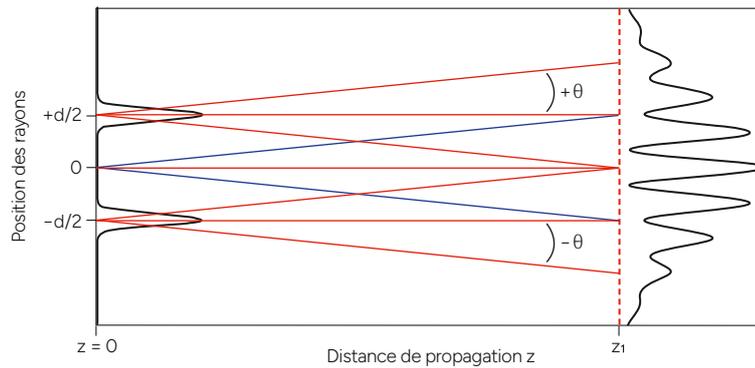
Dans les installations de forte énergie ou forte puissance comme l'installation Laser Mégajoule-Petal, la simulation de la propagation des faisceaux laser est essentielle pour leur exploitation et pour la prédiction des performances. En optique, la propagation des faisceaux cohérents ou partiellement incohérents est régie par des équations différentielles dont le coût de calcul peut être prohibitif. Nous proposons une alternative avec un modèle fondé sur la propagation de rayons lumineux [1]. Les liens entre les caractéristiques du laser et les grandeurs qui régissent l'interaction du faisceau avec la cible sont alors établis. Ainsi, les évolutions et les réglages du laser sont facilités pour assurer une meilleure maîtrise des expériences.

Dans les installations comme l'installation Laser Mégajoule-Petal, les faisceaux laser qui se propagent sont multidimensionnels et la prise en compte des dépendances spatiales et temporelles du faisceau est nécessaire pour reproduire la réalité. De plus, les aspects multiéchelles doivent être pris en compte. En effet, les dimensions spatiales du faisceau dans les systèmes d'amplification d'énergie sont de l'ordre du mètre alors que sur la cible, où l'énergie est déposée, la dimension du faisceau est de quelques dizaines de microns. Dans le domaine temporel, les durées des impulsions sont de quelques nanosecondes dans les systèmes d'amplification d'énergie, mais l'impulsion sur cible est modulée pour le Laser Mégajoule et comprimée pour le laser Petal à une durée proche de la picoseconde. Pour décrire ces faisceaux de manière complète et précise, nous disposons d'un code de simulation de référence, le code Miró développé au CEA-DAM [2]. Néanmoins, ce code ne permet pas de décrire toutes les situations dans des temps de calcul raisonnables, en particulier dans le cas où un grand nombre de faisceaux se superposent (177 faisceaux dans notre installation) ou quand est conduite une étude paramétrique.

C'est pourquoi nous avons développé un nouveau modèle qui décrit la propagation d'un faisceau comme étant celle d'un ensemble de rayons lumineux [1]. Chaque rayon est défini par sa position (x) et par la direction dans laquelle il se propage (angle θ). Dans ce modèle, l'énergie véhiculée par le rayon peut prendre des valeurs positives ou négatives. Pour autant, en chaque point, la somme des énergies portées par les rayons est toujours positive. On parle aussi de fonction énergie dépendant des variables position et angle de propagation, appelée fonction de Wigner. La propriété remarquable de cette représentation est que la propagation des rayons lumineux composant le faisceau suit les lois simples de l'optique géométrique. Le modèle prend en compte aussi bien la propagation dans l'air, la traversée de lentilles pour la focalisation ou la dispersion sur des réseaux de diffraction. La nature géométrique de l'approche n'empêche nullement le modèle d'intégrer les phénomènes de l'optique physique comme la diffraction ou les interférences.

Pour un faisceau de forme gaussienne, la fonction de Wigner est décrite simplement par quelques grandeurs scalaires (énergie, position, direction) et par sa dimension. La description d'un faisceau plus complexe est

FIGURE 1



→ Représentation de la figure d'interférences (trous de Young) engendrée par deux faisceaux gaussiens positionnés à $+d/2$ et $-d/2$ en $z = 0$, se propageant sur une distance z_1 . Dans le plan $z = 0$, parmi l'ensemble des rayons nécessaires pour construire la frange d'interférences, 9 rayons ont été choisis pour illustrer le modèle. Ils sont issus de trois positions comme représentés à gauche : positions $-d/2$, 0 et $d/2$. Les rayons sont **rouges** (respectivement **bleus**) quand ils véhiculent une énergie positive (respectivement négative). Dans le plan d'observation des franges, à $z = z_1$, les neuf rayons se croisent en cinq points pour former des franges brillantes, quand les rayons portent une énergie positive, ou des franges sombres, quand les rayons qui se croisent portent des énergies positives et négatives.

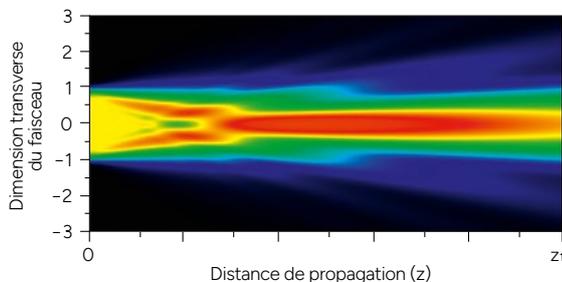
alors obtenue par une décomposition en somme de gaussiennes élémentaires. Il est aussi possible avec ce même principe de décrire les faisceaux incohérents, caractérisés par leurs propriétés statistiques, avec des grandeurs scalaires, comme la largeur du degré de cohérence spatiale du faisceau. Ce modèle donne accès à toutes les quantités mesurables, toujours sous forme de scalaires, par exemple l'intensité au point de focalisation sur la cible.

Afin d'illustrer le fait que la propagation des rayons permet de rendre compte de la diffraction et des interférences, nous avons représenté la visualisation d'un cas d'école. Dans cette expérience, un faisceau illumine un écran percé de deux trous. Après la propagation du faisceau au travers des deux trous, des franges d'interférences apparaissent sur l'écran positionné plus loin (expérience des trous de Young). De façon plus imagée, le tracé de neuf rayons est représenté sur la **FIGURE 1**, afin d'illustrer

l'intérêt de véhiculer sur chaque rayon des énergies positives ou négatives pour que les franges apparaissent dans le plan d'observation. Un exemple de faisceau plus complexe que le faisceau gaussien est donné sur la **FIGURE 2**. Cette figure donne une représentation de la fluence du faisceau en fonction de la distance de propagation z pour un faisceau de forme spatiale carrée. La forme carrée est approchée par une somme de dix gaussiennes.

Le développement de ce modèle s'applique d'ores et déjà à la description de la tache focale du Laser Mégajoule [3] ; il est aujourd'hui limité aux composants optiques linéaires. Avec l'adaptation de ce formalisme à la propagation dans les plasmas, le lien entre les caractéristiques du laser qu'il peut être souhaitable de faire évoluer et les grandeurs statistiques de la tache focale sera alors directement établi. La maîtrise des couplages énergétiques délétères qui apparaissent lors de l'interaction des faisceaux avec le plasma produit par l'illumination de la cible (voir l'article p. 46) sera alors complète.

FIGURE 2



→ Représentation de la fluence d'un faisceau de forme spatiale carrée en fonction de la distance de propagation z . Cette figure est obtenue en décomposant le faisceau et donc la fonction de Wigner en dix gaussiennes élémentaires et en la propageant sur une distance z_1 .

RÉFÉRENCES

- 1 — **H. Coïc, Y. Abdelmoumni-Prunes, C. Rouyer, N. Bonod** « Matrix formulation of the Gaussian expansion of coherent multiple beams in arbitrary dimensions », *J. Opt. Soc. Amer.* **41** (3), p. 560-571 (2024).
- 2 — **O. Morice** « Miró: complete modeling and software for pulse amplification and propagation in high-power laser systems », *Opt. Eng.*, **42**, p. 1530-1541 (2003).
- 3 — **Y. Abdelmoumni-Prunes, C. Rouyer, H. Coïc, D. Bénisti, N. Bonod** « Derivation of the transverse size of the mean speckle throughout propagation from the moments of the Wigner function », *J. Opt. Soc. Amer. A*, **42**(6), p. 842-853 (2025).

Laser Mégajoule : vers des faisceaux plus performants

Une expérience de physique sur le Laser Mégajoule consiste à envoyer tout ou partie des 176 faisceaux laser sur une cible dont la très forte compression déclenche en son cœur des réactions de fusion nucléaire. Si la propagation du laser n'est pas optimale, les pertes d'énergie et les variations d'intensité limitent le nombre de réactions de fusion et peuvent alors remettre en cause la réussite de l'expérience. Nous avons déterminé un réglage du laser qui supprime quasiment les variations d'intensité et réduit de moitié les pertes d'énergie [1,2].

Le Laser Mégajoule, au centre CEA-DAM du Cesta, près de Bordeaux, est un des lasers les plus énergétiques au monde. Il a pour objectif d'étudier la matière dans des conditions de température et de pression extrêmes, comme celles rencontrées pendant le fonctionnement d'une arme nucléaire ou au cœur d'une étoile. Une expérience sur un tel laser consiste à focaliser les faisceaux directement ou indirectement sur une cible qui subit alors une forte compression. La cible est une capsule en plastique de quelques millimètres de diamètre contenant un mélange de deutérium et de tritium dont la compression peut engendrer des réactions de fusion nucléaire.

Au début de l'expérience, les premières couches de matière de la cible sont chauffées par absorption de l'énergie du laser et deviennent rapidement un plasma, c'est-à-dire un mélange d'ions et d'électrons. La propagation du laser dans ce plasma jusqu'aux dernières couches de matière est très perturbée par couplage avec le plasma : des pertes d'énergie sont constatées à cause d'un phénomène de diffusion, et en particulier de rétrodiffusion. Pire, l'amplitude de ce phénomène varie dans l'espace et dans le temps, et ces variations peuvent conduire à une compression asymétrique, perte de symétrie qui peut *in fine* compromettre l'atteinte du nombre de réactions nucléaires recherché pour l'expérience considérée. Il est donc indispensable de réduire ces variations autant que possible. Notons que le CEA-DAM veut de toute façon limiter les pertes d'énergie pour une raison évidente de coût et d'optimisation de performance de l'installation, mais aussi

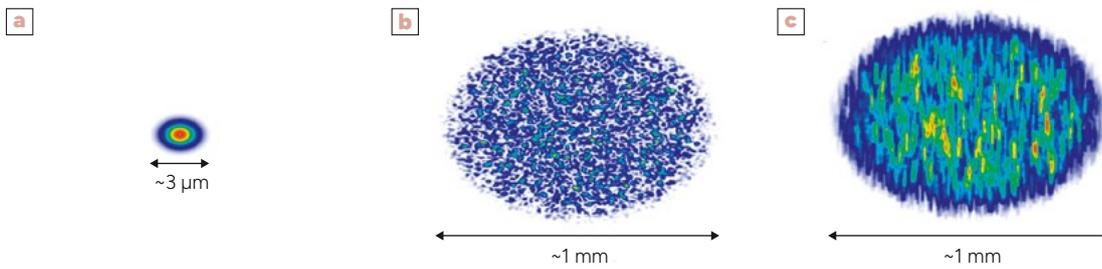
parce que l'intensité rétrodiffusée (diffusion arrière) endommage les composants optiques.

Pour rendre la compression de la capsule plus symétrique et limiter le couplage cohérent du laser au plasma, nous cherchons d'une part à adapter la dimension de la tache focale du laser à celle de la cible et d'autre part à gommer ou lisser les surintensités, c'est-à-dire les points dits points chauds sur la tache focale, où l'intensité atteint son maximum de variation.

L'extraction et le transport des fortes énergies du Laser Mégajoule se font au moyen de faisceaux de grande dimension, de géométrie carrée de 40 cm de côté. La focalisation directe d'un tel faisceau sur la cible concentre l'énergie sur une surface d'environ $10 \mu\text{m}^2$ (FIGURE 1a). La capsule étant millimétrique, il nous faut augmenter la dimension de cette tache focale. Pour cela, un composant optique, appelé lame de phase, est utilisé avant la focalisation pour étaler la zone d'éclairement sur une tache focale de surface égale à 1mm^2 (FIGURE 1b), soit un agrandissement de 100 000. Cette première étape revient à « casser » la cohérence spatiale du faisceau laser pour obtenir une tache focale adaptée. Elle engendre inévitablement, dans le cas d'un faisceau possédant une seule couleur (ou longueur d'onde), de nombreuses surintensités dans la tache focale, comme on le voit sur la FIGURE 1c, faisant apparaître une microstructuration.

Alors, comment faire pour lisser ces surintensités ? Le principe est de les faire bouger rapidement dans le temps et dans l'espace, de sorte qu'elles aient presque disparu (FIGURE 1c) à l'échelle de variation temporelle du plasma. Pour cela, on utilise un modulateur optique qui permet

FIGURE 1

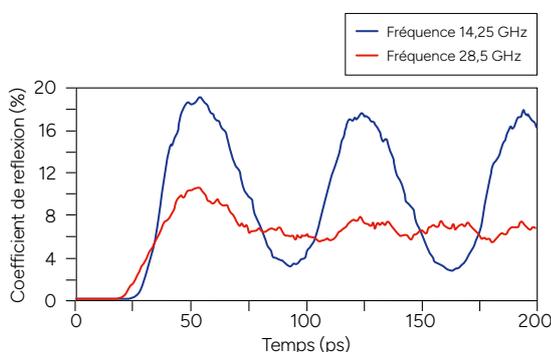


→ [a] Tache focale d'un faisceau du Laser Mégajoule à une seule longueur d'onde. [b] Tache focale du même faisceau dont l'énergie est étalée sur une grande surface adaptée à la cible; des surintensités apparaissent et créent une microstructuration. [c] Tache focale du même faisceau dont la longueur d'onde varie dans le temps et sur la surface de la tache: les surintensités sont lissées. Ces images sont issues de simulations numériques. Dans l'échelle de couleur, le rouge (resp. le blanc) correspond au maximum (resp. minimum) d'intensité, intensité maximale différente pour chaque image.

de changer plusieurs fois de couleur et de revenir à la couleur de départ toutes les 70 picosecondes, soit une fréquence de modulation de 14,25 GHz. À ce modulateur est associée une optique diffractive. Cette optique a le même effet que la goutte de pluie créant un arc-en-ciel en diffractant la lumière blanche du Soleil: les différentes couleurs parcourent des chemins différents et se retrouvent décalées sur la tache focale. Les surintensités se déplacent ainsi très rapidement et en moyenne disparaissent presque complètement (FIGURE 1c). Cette seconde étape qui «brise» la cohérence temporelle du faisceau, associée à la première étape, qui brise la cohérence spatiale, s'appelle le lissage optique.

Des surintensités presque disparues... mais pas tout à fait. Leurs déplacements laissent une trace qui se voit dans l'énergie laser réfléchi par le plasma dans la direction du laser (rétrodiffusion), évaluée par le coefficient de réflexion (FIGURE 2). En effet, les précédents travaux de simulation numérique effectués par notre équipe [3] ont confirmé que le coefficient de réflexion évolue au cours du temps,

FIGURE 2



→ Évolution simulée numériquement du coefficient de réflexion du faisceau laser avec la fréquence actuelle du modulateur du Laser Mégajoule de 14,25 GHz (bleu) ou avec une fréquence double de 28,5 GHz (rouge). Cette dernière supprime quasiment les variations d'intensité (réduction d'un facteur sept) et permet de diminuer les pertes moyennes de 50%.

comme le montre la courbe bleue de la FIGURE 2; il reflète les variations d'intensité du faisceau laser sur cible.

Le type de l'optique diffractive et la fréquence du modulateur choisis pour le Laser Mégajoule sont tels que les différentes couleurs engendrées sont exactement séparées de la taille moyenne d'une surintensité. Une fréquence plus basse conduit à un décalage spatial des surintensités trop faible pour que le lissage soit optimal. Une fréquence plus haute conduit inutilement à un décalage important et le lissage n'est pas meilleur. Jusqu'ici, la communauté scientifique considérait que le réglage idéal du modulateur était une fréquence de 14,25 GHz. Néanmoins, cette considération purement spatiale n'est pas suffisante. Nous avons démontré par la simulation numérique que le doublement de la fréquence du modulateur à 28,5 GHz permettait de réduire de 50% la valeur moyenne du coefficient de réflexion, mais surtout d'un facteur 7 l'amplitude des oscillations (FIGURE 2) [1].

Après ces travaux numériques, des mesures précises des variations temporelles du coefficient de réflexion sont envisagées sur le Laser Mégajoule afin de mettre en œuvre une augmentation de la fréquence et d'en tirer les bénéfices.

RÉFÉRENCES

- 1 A. Fusaro, R. Collin, G. Riazuelo, P. Loiseau, O. Thauvin, D. Penninckx « On the improvement of smoothing by spectral dispersion efficiency for laser-plasma interaction », *Physics of Plasmas*, <https://doi.org/10.1063/5.0179568> (2024).
- 2 D. Penninckx, A. Fusaro, R. Collin, G. Riazuelo, P. Loiseau, O. Thauvin « Optimization of smoothing by spectral dispersion with a sinusoidal phase modulation », *High Energy Density Physics*, <https://doi.org/10.1016/j.hedp.2024.101123> (2024).
- 3 M. Duluc, D. Penninckx, P. Loiseau, G. Riazuelo, A. Bourgeade, A. Chatagnier, E. D'huilières « Comparison of longitudinal and transverse smoothing by spectral dispersion on stimulated Brillouin backscattering in inertial confinement fusion plasmas », *Physics of Plasmas*, <https://doi.org/10.1063/1.5089113> (2019).



A. Trilla, Y. Cano CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

Séisme ou explosion nucléaire : la réponse ne se fait plus attendre

Le CEA - DAM a aujourd'hui les moyens de confirmer en quelques minutes aux autorités françaises qu'une explosion nucléaire est survenue en Corée du Nord. En effet, les sismologues du CEA - DAM viennent de se doter d'un logiciel nommé GridMT qui permet une surveillance améliorée, avec une détection automatique et une caractérisation très rapide de tous les événements sismiques, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique [1]. Cet outil complète les techniques d'analyse d'événements sismiques dont nous disposons pour la lutte contre la prolifération nucléaire.

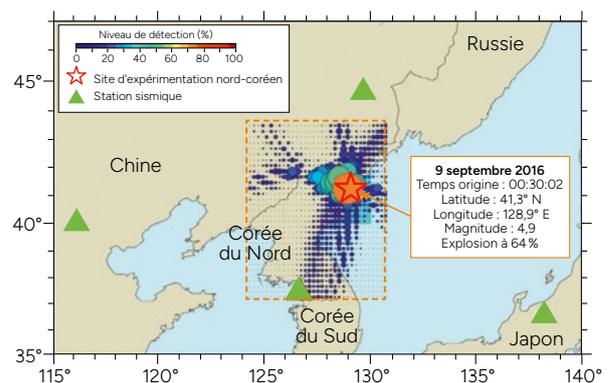
Dimanche 3 septembre 2017, aux premières heures du matin, une alerte sismique réveille le sismologue d'astreinte du CEA-DAM : un événement a été détecté en Corée du Nord, suivi d'un second événement déclenchant une nouvelle alarme. Quelques heures plus tard, les autorités françaises étaient prévenues qu'une explosion nucléaire venait d'avoir lieu. La première alerte correspondait à l'explosion la plus énergétique enregistrée à ce jour sur le site d'expérimentation nord-coréen ; l'origine de la seconde alerte est restée incertaine pendant plusieurs jours. Aujourd'hui, grâce au logiciel GridMT, nous sommes capables en quelques minutes et non plus en quelques heures ou quelques jours de décrypter de tels événements.

Dans le cadre de ses missions, le CEA-DAM dispose d'une chaîne opérationnelle de détection sismique et analyse automatiquement, 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24, les vibrations du sol produites par divers phénomènes. Ces vibrations sont enregistrées par un réseau de sismomètres installés sur le globe terrestre [2]. Elles peuvent être d'origine naturelle, comme des tremblements de terre sur une faille tectonique ou des effondrements de terrain. Elles peuvent aussi être dues aux activités humaines, comme le passage de trains à proximité d'un capteur ou des explosions nucléaires. En cas de détection d'un événement sismique en France ou à l'étranger, une alerte est émise vers le sismologue d'astreinte du CEA-DAM.

Il lui faut alors confirmer la détection de l'événement, déterminer sa localisation, sa magnitude et sa

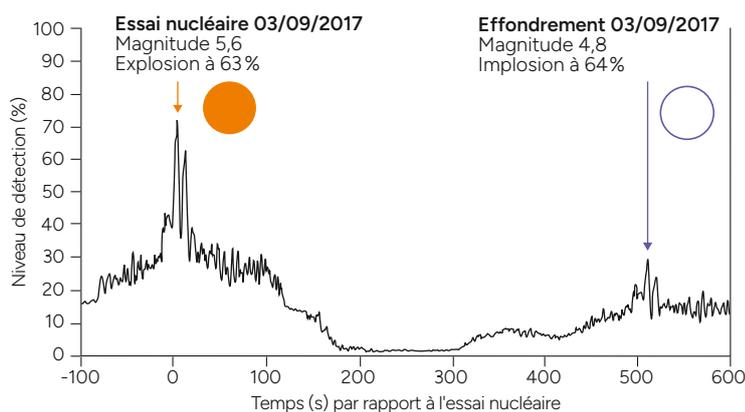
nature [2]. La détermination de la nature de l'événement passe par la caractérisation de la source sismique, c'est-à-dire la détermination de son mécanisme, qui demeure souvent le travail de l'expert dans les heures ou les jours qui suivent. Celui-ci doit en effet identifier le mouvement des failles pour un tremblement de terre ou plus

FIGURE 1



→ Résultats obtenus automatiquement et en quelques minutes avec le logiciel GridMT pour la détection (temps origine) et la caractérisation (localisation, magnitude et nature explosive) de l'essai nucléaire nord-coréen du 9 septembre 2016. L'événement est déterminé comme une explosion à partir des données enregistrées par quatre stations sismiques (triangles verts). À l'intérieur du cadre en pointillé orange se trouve la grille de calcul, la grosseur des cercles et la couleur indiquent le niveau de détection : les valeurs les plus importantes sont obtenues sur le site d'expérimentation nord-coréen.

FIGURE 2



→ Double détection de l'explosion nucléaire du 3 septembre 2017 (premier pic, flèche orange) et de l'effondrement dans le massif montagneux du site d'expérimentation (second pic, flèche en violet).

généralement décrire les forces qui sont responsables de la perturbation du sol enregistrée.

Pour cela, plusieurs méthodes sont disponibles. Les plus rapides sont empiriques, elles procèdent par analogie en s'appuyant sur les connaissances acquises à partir des événements sismiques passés (tremblements de terre, explosions nucléaires, etc.); néanmoins, leur fiabilité et leur précision ne sont pas toujours suffisantes. Le moyen le plus complet d'étudier dans le détail la source des événements est une approche mathématique appelée inversion des formes d'ondes sismiques. Elle permet d'en retrouver les caractéristiques en reproduisant par simulation numérique les signaux enregistrés par les stations sismiques.

Des chercheurs ont appliqué cette méthode d'inversion il y a une quinzaine d'années sur une grille d'épicentres potentiels dans des régions à fort taux de sismicité, comme le Japon et la Californie. Leurs objectifs étaient de détecter automatiquement et de caractériser tous les tremblements de terre se produisant dans ces régions [3,4]. Ces travaux ont abouti au logiciel GridMT (acronyme de *Grid-based real-time Determination of Moment Tensors*). Ainsi, suite à un séisme, toutes les informations importantes de l'événement sont connues en quelques minutes : GridMT identifie un point de la grille (FIGURE 1) comme étant sa localisation à l'instant de détection et fournit aussi une estimation de sa magnitude et de sa nature.

Dans le cadre de sa mission de lutte contre la prolifération nucléaire, le CEA-DAM a récemment appliqué cette méthode à la surveillance automatique des explosions nucléaires en Corée du Nord [1]. Les résultats obtenus ont confirmé la nature des six explosions nucléaires qui ont eu lieu entre 2006 et 2017. Le logiciel GridMT a ensuite été intégré dans la chaîne opérationnelle de détection et d'analyse sismique. Désormais, l'outil aide le sismologue d'astreinte à confirmer et caractériser en quelques

minutes seulement la survenue d'un événement explosif dans la zone d'intérêt.

L'analyse des enregistrements du 3 septembre 2017 avec GridMT a aussi permis de retrouver la nature de la deuxième alerte reçue par le sismologue d'astreinte. Elle correspond pour le physicien à une source implosive qui peut être interprétée comme un effondrement sur le site d'expérimentation nucléaire nord-coréen, à quelques centaines de mètres sous la surface, 8 minutes et 30 secondes après l'essai nucléaire (FIGURE 2). Ce résultat concorde avec les informations révélées par des images satellitaires montrant un affaissement de la surface.

Cette méthode peut aussi être exploitée par le CEA-DAM pour l'analyse en temps réel de tremblements de terre, dans le cadre de l'alerte sismique en France, ou pour les besoins d'alerte au tsunami [4] en région méditerranéenne, par le Centre d'alerte au tsunami (Cenalt).

RÉFÉRENCES

- 1 — A. Guilhem Trilla, Y. Cano « Using moment tensor inversions for rapid seismic source detection and characterization: application to the North Korean nuclear tests », *Pure and Applied Geophysics*, doi: 10.1007/s00024-024-03455-7 (2024).
- 2 — Collectif du CEA - DAM *Détection des essais nucléaires - À l'écoute du globe*, revue chocs, 50, 116 pages (2020).
- 3 — H. Tsuruoka, H. Kawakatsu, T. Urabe « GRID MT (grid-based real-time determination of moment tensors) monitoring the long-period seismic wavefield », *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175, doi:10.1016/j.pepi.2008.02.014 (2009).
- 4 — A. Guilhem, D. S. Dreger, H. Tsuruoka, H. Kawakatsu « Moment tensors for rapid characterization of megathrust earthquakes: the example of the 2011 M 9 Tohoku-oki, Japan earthquake », *Geophysical Journal International*, doi:10.1093/gji/ggs045 (2012).



I. Bezverkhy, V. Boyer, J.-P. Bellat Laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne – UMR 6303 CNRS – Université de Bourgogne-Franche-Comté, Dijon
C. Cabaud CEA - DAM, centre de Valduc

Tamiser un gaz radioactif pour séparer ses composants

Une collaboration entre le CEA - DAM et le laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne vient de démontrer expérimentalement la complémentarité de deux effets pour séparer des isotopes de l'hydrogène par tamisage à l'échelle atomique : le premier dépend de la taille des molécules de gaz par rapport à celle du tamis ; le second implique des interactions fortes entre les molécules et le tamis [1]. Sur la base de ce résultat, le CEA - DAM vient de mettre en place ce procédé de purification du tritium, un isotope radioactif de l'hydrogène et une matière stratégique entrant dans la composition des armes nucléaires de la dissuasion française. Cette avancée permettra d'élaborer des matériaux qui rendront le procédé encore plus efficace.

Le tritium est un gaz radioactif qui possède des propriétés chimiques très voisines de celles de l'hydrogène. Cet isotope est un combustible de la fusion nucléaire, réaction qui alimente en énergie notre Soleil, mais aussi nos armes nucléaires. Avoir du tritium est une chose, en disposer avec une pureté suffisante en est une autre. Cette matière stratégique est purifiée et mise en œuvre dans le centre CEA-DAM de Valduc. Le procédé d'enrichissement du tritium génère comme sous-produit une fraction appauvrie en tritium, contenant majoritairement de l'hydrogène. Ce mélange de gaz contient trop peu de matière d'intérêt pour qu'elle soit valorisée, mais sa charge radioactive reste trop élevée pour qu'un rejet dans l'environnement soit conforme à la réglementation. Il est alors nécessaire de procéder à une ultime purification.

Le procédé de séparation existant est un processus qui nécessite de porter le gaz au contact d'un tamis moléculaire dans un environnement bien particulier, à une température de $-233\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le tamis est en zéolithe, un matériau extrêmement poreux, d'une surface interne de 600 m^2 par gramme. Il est formé d'un assemblage de motifs se répétant à l'infini. Chacun d'eux contient une cage accessible par des ouvertures appelées fenêtres. Chaque fenêtre a une dimension caractéristique de

$0,4$ nanomètre, très proche de la taille apparente d'une molécule de gaz. Par ailleurs, la structure intègre dans la cage des ions qui jouent un rôle primordial. Ces ions apportent à la fois une modulation de la taille de la fenêtre et sont aussi à l'origine de fortes interactions électrostatiques avec les molécules d'hydrogène et de tritium.

L'amélioration des performances de ces matériaux est le principal levier pour réduire la taille du cryostat du procédé industriel, dispositif coûteux en ressources énergétiques et dont le dimensionnement croît exponentiellement avec la quantité de matériau à refroidir.

Le tritium étant radioactif, la mise au point de ce procédé est réalisée avec un isotope non radioactif de l'hydrogène, le deutérium. La recherche est donc menée dans un premier temps en laboratoire sur la séparation entre hydrogène et deutérium. Le gaz est refroidi à $-233\text{ }^{\circ}\text{C}$ afin d'optimiser la probabilité pour les molécules de pénétrer dans la cage et de permettre leur adsorption. En effet, l'agitation moléculaire est alors fortement réduite. À cette échelle atomique, on parle de tamisage quantique. Le principe est schématisé sur la **FIGURE 1**.

Dans le cadre de nos travaux [1,2], deux ions différents sont positionnés dans une structure de zéolithe de type A : du lithium donnant le matériau noté Li-A, et du sodium donnant le matériau noté Na-A.

FIGURE 1



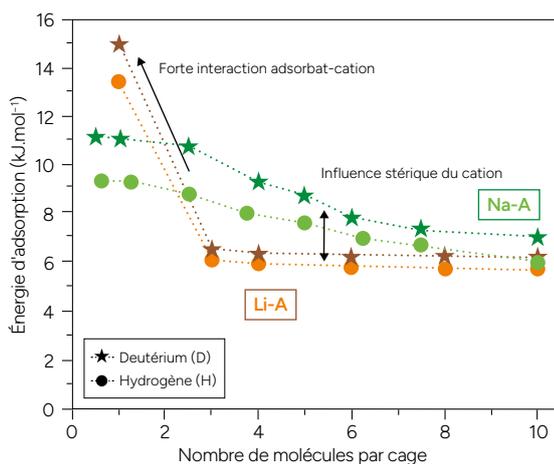
→ Schéma de principe du tamisage quantique. Les molécules de gaz (H : hydrogène, D : deutérium) sont mises au contact du tamis (zéolithe) à une température de $-233\text{ }^{\circ}\text{C}$. Seul le deutérium pénètre dans le matériau et s'adsorbe à la surface de la cage. L'hydrogène n'accède pas à l'intérieur et passe à côté du tamis. Dans un cas idéal, la séparation est totale.

Grâce à ces ions, ces matériaux piègent environ dix fois plus de deutérium que d'hydrogène dans les cages de la zéolithe. Mais le type d'ion implanté a surtout permis de mettre en évidence deux phénomènes distincts suivant le remplissage, essentiels pour améliorer les performances de la purification. À faible remplissage (moins de deux molécules adsorbées par cage), les interactions électrostatiques (répulsives) entre les ions et les molécules sont prépondérantes et elles sont propres à la nature de l'ion. Sur la **FIGURE 2**, le lithium présente une très forte

interaction avec les molécules. À plus fort remplissage, l'ion est écranté par ces premières molécules, ce premier effet s'estompe. La sélectivité est alors gouvernée par la taille des fenêtres modulée par la présence d'ions plus ou moins volumineux. Les molécules de deutérium, plus petites que celles d'hydrogène, accèdent alors plus facilement aux cages. Le choix de l'ion est donc un paramètre clé pour l'élaboration de matériaux plus performants.

Ces travaux constituent une avancée vers le concept de matériaux plus efficaces pour la séparation du tritium. Ils contribueront à terme à l'amélioration du processus de traitement industriel pour le rendre plus performant. En parallèle, les études se poursuivent. Les données expérimentales acquises servent à alimenter des outils de simulation numérique. L'objectif est à terme de parvenir à prédire le comportement des tamis en fonction de leur structure et des ions. La réalisation d'expériences sera alors réservée aux matériaux identifiés numériquement comme les plus prometteurs, une manière bien plus efficace de réaliser le meilleur tamisage.

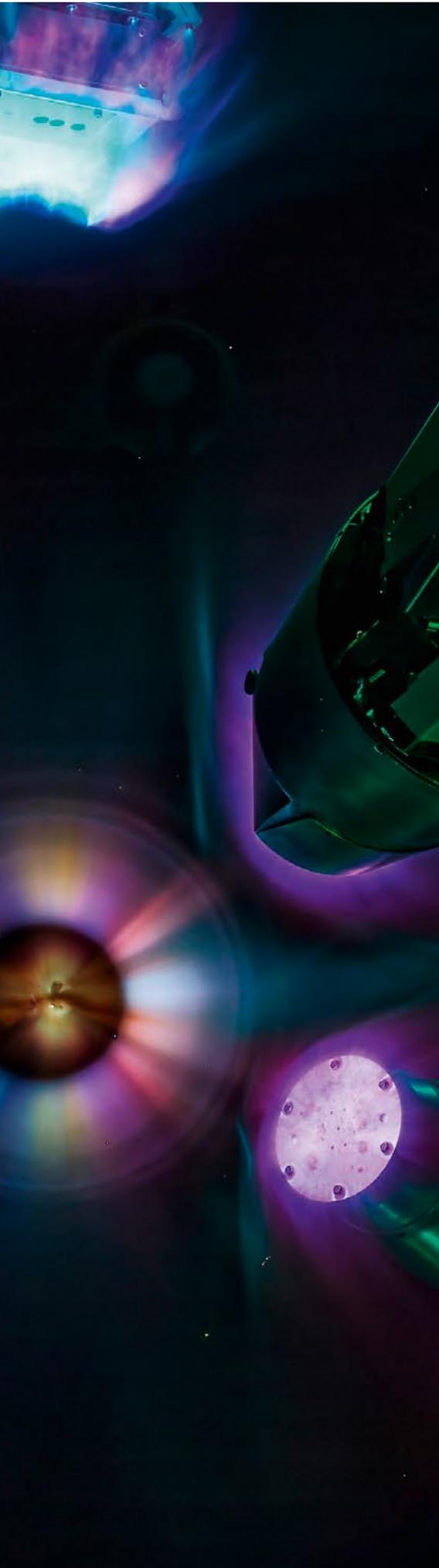
FIGURE 2



→ Variation de l'énergie d'adsorption (de H ou D) pour Li-A et Na-A en fonction du remplissage d'une cage. À faible remplissage (moins de deux molécules par cage), l'interaction électrostatique est le mécanisme de séparation prépondérant. Elle est très marquée pour le lithium. À plus fort remplissage, l'ion Na^+ , plus gros, laisse préférentiellement l'accès au deutérium qui est de plus petite taille que l'hydrogène. Pour les deux mécanismes, l'adsorption du deutérium est favorisée et il en va donc de même pour le tritium.

RÉFÉRENCES

1. I. Bezverkhy, V. Boyer, C. Cabaud, J.-P. Bellat « D_2/H_2 separation by quantum sieving in LiNaA zeolites: the role of aperture size and strong guest-cation interactions », *Adsorption*, <https://doi.org/10.1007/s10450-023-00425-8> (2023).
2. I. Bezverkhy, M. Giraudet, C. Dirand, M. Macaud, J.-P. Bellat « Enhancement of D_2/H_2 selectivity in zeolite A through partial Na-K exchange: single-gas and coadsorption studies at 45-77 K », *Journal of Physical Chemistry C*, <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c06902> (2020).



CHOCS #19 **avancées**

BILAN 2024

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

cea

JUILLET 2025
WWW-DAM.CEA.FR