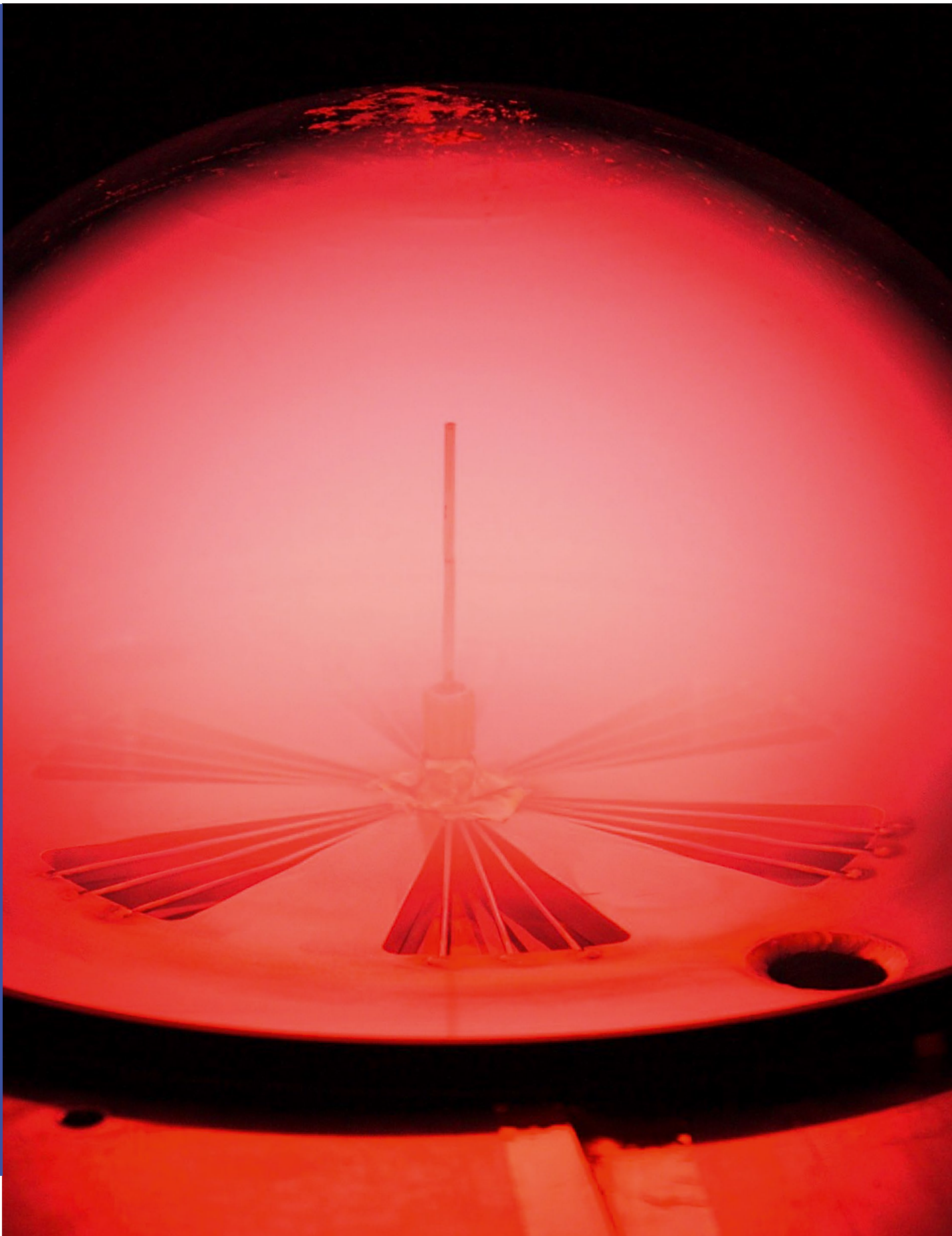
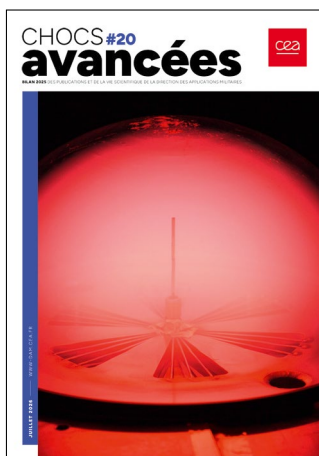


CHOCS #20 avancées



BILAN 2025 DES PUBLICATIONS ET DE LA VIE SCIENTIFIQUE DE LA DIRECTION DES APPLICATIONS MILITAIRES





COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES

Directeur de la publication

Olivier Vacus

Coordinateur scientifique

Jean-Christophe Joly, Daniel Bouche

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, Jean-François Clouet,
Cyrille De Saint-Jean, Virgile Guyot,
Hélène Hébert, Jean-Christophe Joly,
Pierre-Henri Maire, Nicolas Richard,
Éric Royer, Nicolas Saurel,
Christophe Thiébaut, Stéphanie Thiébaut,
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

Antenne VHF miniature à résonance plasmonique étudiée dans le cadre des travaux de thèse récents de Maëva Juste et Adrien Laffont. Reconfigurable en fréquence, elle peut permettre de protéger des équipements électroniques.

© CEA - DAM



Consulter la
version numérique 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 — Fusion inertielle : comprendre les collisions pour dompter les ondes du plasma

R. Capdessus, C. Ruyer, P. Loiseau, P.-É. Masson-Laborde, A. Debayle

P. 12 — Reproduire en laboratoire les mélanges de matière caractéristiques du Soleil

L. Lecherbourg, C. Blancard, P. Cossé, G. Faussurier, L. Gremillet, O. Poujade, C. Reverdin, A. Chaleil, B. Loupias, J.-C. Pain, P. Renaudin, S. Baton, L. Duthoit, F. Pérez

P. 14 — Sonder la matière comprimée avec des rayons X créés par laser

G. Sary, W. Cayzac, X. Davoine, N. Blanchot, A. Chobriat, J. Thibert, J. Schunck



PHYSIQUE NUCLÉAIRE

P. 16 — Néon 20 : un noyau en forme de quille pour sonder la matière de l'Univers primitif

J.-P. Ebran, B. Bally, T. Duguet, V. Soma

P. 18 — Fission nucléaire : découverte d'un nouvel îlot de fission asymétrique

P. Morfouace, J. Taieb, A. Chatillon, B. Mauss, G. Blanchon, N. Dubray, N. Pillet, D. Régnier



PHYSIQUE DE LA MATIÈRE CONDENSÉE

P. 20 — Dans les profondeurs des planètes géantes, une forme de glace surprenante

A. Forestier, G. Weck, P. Loubeyre, F. Datchi, S. Ninet, G. Garbarino, M. Mezouar



PHYSIQUE DES ACCÉLÉRATEURS

P. 22 — Des loopings sur l'accélérateur d'électrons Elsa

A. Pires, V. Le Flanchec, A.-S. Chauchat, N. Delerue



MATÉRIAUX, PHYSIQUE DU SOLIDE

P. 24 — Quand isolation rime avec densification

D. Rochais, T. Piquero, Y. Scaringella-Guerriat, A. Benjira, G. Antou, D. Andre, A. Maitre



MÉCANIQUE ET THERMIQUE

P. 26 — Rentrée atmosphérique : quel culot ?

D. Toussaint, J.-P. Braeunig, C. Baranger, H. Noubel, V. Lago

P. 28 — Des lasers pour améliorer la résistance des satellites

B. Aubert, D. Hébert, J.-L. Rullier, E. Lescoute, L. Videau, L. Berthe

P. 30 — La chute accidentelle d'un explosif peut-elle conduire à sa détonation ?

E. Hamon, D. Picart, M. Caliez, A. Frachon, M. Gratton



THERMOHYDRAULIQUE ET MÉCANIQUE DES FLUIDES

P. 32 — Explosion du port de Beyrouth : des éclaircissements grâce au calcul haute performance

S. Terrana, S. Jaouen, O. Gainville



ÉLECTROMAGNÉTISME, GÉNIE ÉLECTRIQUE

P. 34 — Caractérisation d'antenne pour la recherche de vulnérabilité des systèmes électroniques

N. Castagnet, Escudé, A. Boyer

P. 36 — Trente ans de progrès en simulation numérique de l'électromagnétisme

T. Abboud, Y. Beniguel, Q. Carayol, H. Steve, J.-L. Guiraud, G. Kubicke, M. Lecouvez, P. Ratajczak, J. Simon Onera



INSTRUMENTATION, MÉTROLOGIE ET CONTRÔLE

P. 38 — Quand l'intelligence artificielle améliore le traitement d'images radiographiques

T. Braure, D. Hateau, V. Brandon, K. Ginsburger, D. Lazaro



OPTIQUE ET OPTRONIQUE

P. 40 — Optimiser le dépôt d'énergie laser sur les cibles d'expériences

J. G. Moreau, C. Rouyer, N. Blanchot, X. Ribeyre, J. Neauport, C. Rousseaux, D. Penninckx, A. Fusaro, P. Loiseau, G. Riazuelo, S. Baton, L. Lancia



SCIENCE DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT

P. 42 — Le blé, référence métrologique internationale pour la mesure du tritium

Y. Losset, N. Baglan, A. Ritt, C. Dalencourt, M. Crozet

P. 44 — Neuf secondes dans le ciel normand : une enquête multitechnologique sur l'astéroïde 2023 CX1

A. Le Pichon, J. Vergoz, G. Mazet-Roux, A. Egal



CHIMIE

P. 46 — Modification des abondances isotopiques : quand la physique nucléaire rencontre la chimie

É. Pili, C. Fitoussi, E. Yobregat, M. Touboul, C. Gardin

P. 48 — L'effet insoupçonné des alcalins sur le plutonium en solution

G. Lasnier, J. Aupiais, B. Siberchicot



MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE SCIENTIFIQUE, LOGICIEL

P. 50 — Des simulations rapides et précises de mélanges turbulents

A. Briard, B.-J. Gréa, L. Oteski, O. Souillard, J. Griffond, S. Thévenin, L. Danaila

P. 52 — Julia : un langage de programmation pour les supercalculateurs de demain ?

L. Briand, H. Jourden, M. Pérache

Édito

Une excellence académique, scientifique et technologique au service de la souveraineté française et européenne

Exceptionnellement, le titre de cet éditorial est un emprunt. Je me suis en effet permis de reprendre, mot pour mot, l'intitulé du onzième objectif de la *Revue nationale stratégique 2025*, tant il me semblait parfaitement en phase avec les priorités actuelles de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA.

Rappelons que la *Revue nationale stratégique* est un document fondamental pour la défense et la sécurité de la France. Elle décrit les évolutions géopolitiques et sociétales qui expliquent les priorités retenues par le gouvernement dans ces domaines. Or, ce qui caractérise notre époque, c'est une « *dégradation accélérée de l'environnement sécuritaire mondial* ». L'agression de l'Ukraine par la Russie en 2022 a été la confirmation d'une désinhibition du recours à la force, tandis que les progrès rapides de l'intelligence artificielle venaient encore aggraver le pouvoir de nuisance de la cybercriminalité. Pourtant, en dépit de ce constat qui s'impose à tous, la France a décidé de prendre « *des dispositions pour assurer une recherche d'excellence et la création des briques essentielles* » au service de sa souveraineté, ce qui suppose notamment « *de maîtriser les avancées technologiques clés sur le long terme* ».

La DAM compte bien prendre toute sa part dans cet effort national. Cela lui sera d'autant plus aisé qu'elle sait depuis longtemps que l'innovation et la préparation du futur ne sont pas un luxe en temps de crise, mais des conditions *sine qua non* du succès. L'exemple du programme Simulation est à ce titre emblématique. En 1996, la France se passait définitivement du recours aux essais nucléaires pour garantir les performances et la sûreté de ses têtes nucléaires. Elle s'autorisait ce virage méthodologique majeur lui permettant de renforcer sa posture d'État doté responsable, car, dans le même temps, elle lançait ce programme scientifique ambitieux afin que la pérennité et la crédibilité de la dissuasion nucléaire française ne soient en rien altérées. Les équipes de la DAM ont su relever ce défi : le programme Simulation est aujourd'hui un succès et son trentième anniversaire est fêté en 2026 comme il se doit.

Fruit d'efforts constants pendant trois décennies, le programme Simulation est aujourd'hui doté de trois piliers solides. Pour ce qui concerne la puissance de calcul, les deux partitions du supercalculateur Exa1 du centre DAM Île-de-France sont pleinement opérationnelles, pour un coût énergétique maîtrisé. Illustration des gains qui en découlent : l'article marquant les trente ans de progrès en simulation numérique de l'électromagnétisme (p. 36-37) signale par exemple que, dans ce domaine, « *un calcul d'une heure aujourd'hui aurait nécessité 5 000 ans dans les années 1990* ». Pour ce qui concerne ses deux installations expérimentales

majeures, elles ont atteint leur pleine maturité en 2025. La machine radiographique Merlin, équipant l'installation Epure, a été inaugurée en mai au centre de Valduc en présence de nos partenaires britanniques, et la première expérience mettant en œuvre les trois axes radiographiques a été réalisée en fin d'année. Le Laser Mégajoule, quant à lui, a été achevé en fin d'année dans le centre du Cesta et compte aujourd'hui 176 faisceaux laser.

Ces moyens sont exceptionnels. S'ils permettent à la DAM de remplir ses missions de conception et de garantie d'armes de dissuasion crédibles, ils contribuent aussi à positionner la France à l'état de l'art dans des domaines scientifiques et techniques stratégiques.

On ne dira jamais assez à quel point tous les domaines de R&D auxquels la DAM s'intéresse pour ses programmes ouvrent des perspectives non seulement pour les programmes militaires, mais aussi pour les programmes civils. La recherche par la DAM et ses partenaires est ainsi le plus souvent une recherche duale. Ce n'est pas un hasard si l'installation Laser Mégajoule-Petal est ouverte à la communauté académique à hauteur de 25 % de ses activités expérimentales ; elle permet ainsi des études fondamentales d'astrophysique ou encore l'évaluation de la faisabilité de la production d'énergie par fusion inertielle. Ce n'est pas un hasard si le Très Grand Centre de calcul (TGCC) de Bruyères-le-Châtel a accueilli Ruby et Lucy, premiers démonstrateurs opérationnels d'ordinateur quantique (livrés respectivement par les sociétés Pasqal et Qandela), et qu'il accueillera prochainement la machine Alice-Recoque, second calculateur exaflopique européen. Ce n'est pas un hasard enfin, et sans prétendre ici à l'exhaustivité, si le Laboratoire des composites thermostrostructuraux (LCTS), à Bordeaux, unité mixte de recherche de la DAM, travaille en même temps à la mise au point des revêtements des futurs objets de vol hypersoniques et à la décarbonation de l'industrie sidérurgique ou aux matériaux des futurs moteurs de fusée.

Le lecteur intéressé par un exemple plus détaillé pourra consulter l'article de ce numéro intitulé « Néon 20 : un noyau en forme de quille pour sonder la matière de l'Univers primitif » (p. 16-17). La façon dont les avancées fondamentales réussies par les équipes de la DAM dans le domaine de la physique nucléaire ont amené le Cern à adapter son programme de travail sur le LHC (Large Hadron Collider) est une magnifique reconnaissance de la qualité de ces travaux et de leur portée universelle. Je suis heureux de pouvoir saluer ici ces résultats spectaculaires, parfaite illustration de la place que peut tenir la DAM aux côtés de ses partenaires nationaux et internationaux.

Plus généralement, je me réjouis de la large reconnaissance de notre rôle particulier, à l'interface des mondes de l'industrie et de la recherche, de la Défense et des applications civiles, et je constate chaque année avec satisfaction le nombre toujours croissant d'étudiants qui décident de nous rejoindre pour un doctorat ou un stage postdoctoral. Je nous souhaite, collectivement, de nouvelles décennies d'études ambitieuses pour répondre de notre mieux aux exigences d'un monde en profonde mutation.



Olivier Vacus

Directeur scientifique du CEA - DAM

Vie scientifique



PRIX ET DISTINCTIONS EN 2025

Prix Humboldt Research Award

Luc BERGE, du centre DAM Île-de-France, mis à disposition au Celia, a reçu le 26 juin à Berlin le prix Humboldt pour ses travaux sur la collapse d'ondes non linéaires, la filamentation d'impulsions laser femtoseconde et la génération de rayonnement térahertz par interaction laser-plasma. Financé par la Fondation Alexander von Humboldt, ce prix soutiendra un projet de recherche avec des chercheurs allemands de réputation internationale. Luc Bergé enseignera prochainement à l'université Leibniz de Hanovre et à l'Institut Max-Born de Berlin.

Prix du meilleur article lors de la conférence FAR 2025

Beatriz CARDA, doctorante au centre du Cesta et au laboratoire Icare du CNRS à Orléans, a remporté le prix du meilleur article dans la catégorie des doctorants lors de la conférence internationale FAR (*Flight vehicles, Aerothermodynamics and Re-entry*) à Arcachon en mai. Ses travaux de thèse concernent la modélisation et l'expérimentation des écoulements hypersoniques raréfiés.

Prix Angus-Macleod

Solène BERTET, doctorante au centre du Cesta, a reçu en mai le prix Angus-Macleod de la deuxième meilleure présentation

étudiante lors de la conférence Optical Interference Coatings. Menés en collaboration avec le Laboratory for Laser Energetics, le centre du Ripault et l'Institut des nanosciences de Paris, ses travaux portent sur la faisabilité de lames quart d'onde fabriquées par technique de dépôt GLAD (*glancing angle deposition*) pour le lissage optique de laser de puissance.

Prix de l'innovation lors de la conférence Science & Technology

Au terme d'un travail mené en collaboration avec Telecom Paris, le centre DAM Île-de-France a développé une nouvelle méthode de traitement d'antenne. Appliquée aux stations du Système de surveillance internationale de l'Otice, la méthode a été présentée au cours de la conférence Science & Technology à Vienne en septembre. Les résultats ont été récompensés par le prix de « la plus grande avancée scientifique pour la vérification du traité », décerné à **Benjamin POSTE**.

Prix Henri-Jammet

Charles-Philippe MANO, doctorant au centre DAM Île-de-France, a reçu le prix Henri-Jammet du meilleur jeune professionnel de la radioprotection lors du congrès national de la Société fran-

çaise de radioprotection. Ses recherches concernent l'analyse des spectres obtenus lors de mesures aéroportées et dans le cadre de la détection des essais nucléaires.

Prix du meilleur poster au congrès Migration '25 à New Orleans

Guillaume LASNIER, doctorant au centre DAM Île-de-France, a reçu en septembre le prix du meilleur poster au congrès Migration 2025 à La Nouvelle-Orléans. Le jury a salué la qualité scientifique de son travail, qui a résolu une controverse de vingt ans sur l'hydrolyse des actinides pentavalents entre équipes américaine et allemande.

Prix de thèse Jacques-Haïssinski

Abel PIRES, du centre DAM Île-de-France, a reçu en octobre de la Société française de physique le premier prix de thèse Jacques-Haïssinski pour ses travaux sur l'optimisation d'une source de rayons X par effet Compton inverse. Sa thèse, alliant modélisation et expérimentation, porte sur l'interaction d'un faisceau laser avec le faisceau d'électrons de l'accélérateur Elsa pour générer un rayonnement X aux caractéristiques variables. Cette versatilité permet d'étendre les capacités expérimentales de l'installation et ouvre de nouvelles perspectives pour la modélisation des phénomènes d'interaction.



COLLOQUES ORGANISÉS EN 2025

74^e conférence de l'Aeroballistic Range Association

Organisée en septembre par le centre de Gramat et la société Thiot Ingénierie, cette conférence internationale a rassemblé une centaine de participants, industriels, universitaires et institutionnels du domaine des canons et lanceurs de laboratoire. Les thèmes abordés relevaient de la technologie et du développement des lanceurs, de la métrologie pour l'étude de comportements dynamiques rapides, de la mécanique des chocs, de la balistique et de la sécurité sur les champs de tir.

Programme interministériel R&D NRBC-E

La 6^e conférence internationale R&D NRBC-E a rassemblé à Strasbourg du 19 au 21 mars plus de 650 participants de 29 pays, dont 80 participants issus des quatre directions opérationnelles du CEA. L'événement a abordé des domaines

majeurs (détection-identification, protection-décontamination, contre-mesures médicales, gestion des risques et des crises), à travers conférences, workshops, démonstrations et posters. Les participants ont également pu explorer plusieurs stands, dont celui du CEA mettant en avant des technologies de pointe issues du programme interministériel de R&D pour la lutte contre le terrorisme NRBC-E, piloté, au CEA, par la DAM. Le CEA a contribué activement au programme scientifique, tant au sein du comité scientifique qu'en participant activement aux conférences et en présentant une série de posters.

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 au centre du Cesta les 8 et 9 octobre. Cet événement a réuni près de

100 participants dont 80 venus du Lawrence Livermore National Laboratory (NIF), de l'université de Rochester (LLE), d'Aldermaston (AWE), des installations ELI-ALPS, ELI-NP, ELI-Beams, du Lulac à Palaiseau, du Slac de Stanford, du STFC (Rutherford) et de la Sandia. Chaque installation a présenté son avancement et des tables rondes ont eu lieu sur des thèmes liés à l'exploitation de ces installations. Le centre du Cesta a organisé des visites de laboratoires et des démonstrations *in situ*, permettant aux participants d'échanger sur leurs expériences.

Journées de la chimie à la DAM : une édition 2025 riche de synergies

Organisée à Tours les 17 et 18 juin, l'édition 2025 a rassemblé près de cent chercheurs des centres de Valduc, DAM Île-de-France, du Ripault et du Cesta, ainsi que des représentants de la DRF, de la DES,

de la DRT et de laboratoires académiques partenaires. Les échanges ont porté sur les voies d'élaboration de molécules et de matériaux, les procédés innovants, l'analyse et la caractérisation ou encore la modélisation prédictive. Ces journées ont permis de croiser les expertises, d'identifier des synergies et de lancer des collaborations intercentres et interdirections du CEA.

Journée Simulation haute-fidélité des écoulements hypersoniques

La transition laminaire-turbulent et la turbulence demeurent des sujets cruciaux pour les écoulements hypersoniques. La mise au point de modèles physiques précis requiert des outils de simulation dits à haute fidélité, capables d'appréhender le caractère multiéchelle de ces phénomènes. Le CEA - DAM a organisé le 12 mars à Bordeaux une journée thématique Simulation haute-fidélité qui a rassemblé une trentaine de chercheurs issus des centres du Cesta, DAM Île-de-France, de l'Onera, de l'université Paris-Sorbonne, ainsi que des laboratoires Coria, DynFluid et du Cerfacs.

Conférence FAR 2025

Coorganisée par le Cesta, l'ESA et l'association HyFAR-ARA à Arcachon du 18 au 22 mai, la troisième édition de la conférence FAR (*Flight vehicles, Aerothermodynamics and Re-entry*) a rassemblé plus de 300 participants de l'industrie, du monde académique et des agences gouvernementales (ArianeGroup, Thales Alenia Space, MBDA, Cnes, Onera, CEA, Cira, DLR, etc.). La qualité des travaux conduits dans le domaine de la rentrée atmosphérique par les équipes du CEA - DAM a été particulièrement appréciée.

Workshop RSP² 2025

La sixième édition du workshop RSP² dédié aux ruptures scientifiques et progrès dans les domaines de la rentrée, des signatures et de la pénétration, s'est tenue au Cesta les 16 et 17 octobre. Ce séminaire vise à présenter les avancées et ruptures attendues dans les thématiques liées à l'enveloppe des têtes nucléaires et à animer les réseaux d'experts concernés. Le programme des deux journées a comporté vingt présentations orales et seize posters devant 96 auditeurs du CEA - DAM.

Colloque pour les 20 ans du LRC Meso

Le colloque pour les 20 ans du laboratoire de recherche conventionné (LRC) Meso a réuni du 29 septembre au 3 octobre à Cadarache une vingtaine de chercheurs du CEA - DAM et de l'ENS Paris-Saclay qui collaborent depuis 2005. Des exposés sur la modélisation des matériaux, l'électromagnétisme, les équations cinétiques, la mécanique des fluides, l'apprentissage et le calcul intensif ont donné lieu à de nombreux échanges. Ce colloque a démontré la vitalité du LRC Meso et en a confirmé la

pertinence en tant que structure d'accompagnement à la recherche pour le CEA.

Symposium MeshTrends à la conférence USNCCM18 2025

À la 18^e conférence U.S. National Congress on Computational Mechanics, qui s'est tenue en juillet, le symposium MeshTrends a été coorganisé par Franck Ledoux (DAM Île-de-France), S. Owen (Sandia National Laboratory) et R. Garimella (Los Alamos National Laboratory). Ce symposium a traité les travaux récents sur la génération de maillage non structuré.

Lustre Administrator and Developer Workshop

Le Lustre Administrator and Developer Workshop (LAD), organisé annuellement par le centre DAM Île-de-France, est un événement international réunissant développeurs, professionnels du stockage et architectes de centres de calcul. Lustre, système de fichiers *open source* pour supercalculateurs, équipe une grande partie des machines du TOP500. En 2025, le LAD s'est tenu à Toulouse, accueillant 85 participants de 27 organisations et 15 nationalités (États-Unis, Japon, Brésil, Australie, Europe, etc.). Cet événement permet d'échanger sur les évolutions futures de Lustre, notamment en matière de performances, de sécurité et d'écosystème logiciel. En animant cette collaboration, la DAM contribue à définir les priorités pour ce composant clé des supercalculateurs, répondant aux besoins du calcul haute performance du CEA.

Workshop QRUCH

Le QRuch, pour *Quantum Resources for Unified Computing Hub*, a été coorganisé par le centre DAM Île-de-France. L'arrivée des premiers ordinateurs quantiques pose la question de leur intégration, notamment au niveau logiciel : authentification, ordonnancement, hybridation HPC-QC, et du manque de standards. Ce workshop d'une demi-journée a présenté les outils et *frameworks* (souvent en Python) pour intégrer ces ressources quantiques dans les infrastructures existantes, afin de les rendre accessibles aux utilisateurs finaux.

10^e colloque scientifique du groupe hyperspectral

Le 10^e colloque scientifique du groupe hyperspectral de la Société française de photogrammétrie et télédétection, coorganisé par le centre DAM Île-de-France, s'est tenu du 5 au 7 mai à Grasse (société ACRI-ST). Il a réuni 80 experts en télédétection hyperspectrale autour des thèmes du littoral, de l'atmosphère, de la végétation, des sols, de l'instrumentation et des méthodes de traitement. Un état des lieux des missions spatiales actuelles et à venir a été fait. Le centre DAM Île-de-France a présenté plusieurs interventions orales et a piloté la session dédiée aux études atmosphériques.

Séminaire GTE sur l'IA

Le groupe de travail Environnement terrestre du CEA (GTE) organise un cycle de séminaires dédié à l'intelligence artificielle (IA). Après le premier séminaire sur les enjeux de l'IA en géosciences, un second sur l'IA pour l'analyse et la prévision des événements rares et extrêmes s'est tenu le 12 juin à Saclay. Coorganisé par la DAM, l'événement a mis en lumière la R&D en IA dans plusieurs directions du CEA, mais également chez ses nombreux partenaires (Météo France, IPSL, CNRS, Inria, ENS Paris, IPGP, Inrae). Les exposés ont abordé les enjeux de l'IA pour l'émulation de codes et les applications pluridisciplinaires, suivis d'une table ronde sur la structuration de l'IA au CEA.

LIVRES PARUS EN 2025



Buffon ou l'âge de la Terre. Naissance de l'astrophysique de laboratoire

Émeric FALIZE (CEA - DAM)

Éditions Honoré Champion, 2025, ISBN 78-2-7453-6405-0.

Ce livre raconte comment G.-L. Leclerc de Buffon réalisa l'une des premières expériences d'astrophysique de laboratoire. Pour pouvoir déterminer l'âge de la Terre à partir d'expériences dans ses forges, le savant des Lumières n'eut d'autre choix que d'inventer tous les concepts utilisés aujourd'hui en astrophysique de laboratoire. En partant sur les traces de Buffon, É. Falize a fait se collisionner l'astrophysique du XXI^e siècle avec l'histoire naturelle du XVIII^e siècle. Il en résulta, en 2022, la réplique de l'expérience dite des boulets de fer de Buffon. Ce livre raconte la rencontre entre un astrophysicien d'aujourd'hui et l'un des savants les plus influents du XVIII^e siècle.

Materials informatics: Applications of cheminformatics and machine learning in novel materials (design)

Trois chapitres par Didier MATHIEU (CEA - DAM) : « Introduction to machine learning for predictive modelling of organic materials », « Introduction to predicting organic materials properties », « Applications of predictive modelling for energetic materials ».

Éditions Springer, mars 2025, ISBN 978-3-031-78723-2.

→ FAITS MARQUANTS 2025

Inauguration de l'installation Epure

La cérémonie d'inauguration de l'installation franco-britannique Epure, unique au monde, et dans sa configuration complète à trois axes, a eu lieu le 21 mai à Valduc. Le directeur des applications militaires du CEA et son homologue britannique y ont assisté, ainsi que 200 salariés français et britanniques et les industriels partenaires. Ce projet ambitieux, salué pour les défis relevés, permet à la France et au Royaume-Uni de garantir la performance de leurs têtes nucléaires, renforçant ainsi leur dis-

suasion nucléaire. Quelques mois plus tard, la première expérience hydrodynamique mettant en œuvre les trois axes radiographiques a confirmé la pleine disponibilité de l'installation.

Achèvement du Laser Mégajoule

Le montage en décembre de la dernière chaîne du Laser Mégajoule a marqué non seulement l'aboutissement d'une aventure scientifique, technologique et industrielle extraordinaire, mais aussi l'engagement et le travail durant vingt ans de milliers de

femmes et d'hommes du CEA - DAM et de centaines de partenaires industriels, dans la construction et le montage de cette installation essentielle du programme Simulation. Depuis la mise en service de la première chaîne laser en 2014, le montage s'est poursuivi et des expériences de physique de plus en plus nombreuses et complexes ont été réalisées. Ce projet ambitieux participe directement à la crédibilité de la dissuasion nucléaire française.

Petal : le seuil du pétawatt franchi

Le 22 avril, le faisceau laser Petal a délivré 744 joules en 680 femtosecondes, soit une puissance de 1,09 pétawatt au centre de la chambre d'expérience du Laser Mégajoule. Bien que le seuil du pétawatt ait été franchi en 2015, le transport du faisceau vers la chambre n'était pas possible à l'époque. Grâce au programme PETALUPgrade, financé par la région Nouvelle-Aquitaine et l'État depuis mi-2021, les équipes du Cesta ont amélioré les revêtements pour supporter ces flux intenses et mis en place des miroirs de nouvelle génération. Ces travaux permettent désormais des expériences avec des intensités colossales de plus de $2,2 \cdot 10^{19}$ W/cm², ouvrant la voie à l'étude de phénomènes physiques en conditions extrêmes.



→ NOUVEAUX ACCORDS DE PARTENARIAT EN 2025

LRC Electra

Le laboratoire de recherche conventionné Electra entre le CEA - DAM et l'Institut de recherche sur les céramiques (Ircer) de Limoges a été renouvelé. Fruit d'une collaboration historique entre l'Ircer et le centre du Ripault, centré initialement sur les matériaux et procédés céramiques, il a vu son périmètre s'élargir avec l'intégration de nouvelles thématiques et des centres du Cesta et de Valduc. La direction de l'Ircer a salué l'initiative de ce nouveau format de partenariat qui structure l'avenir de la collaboration.

Création du LRC (MC)2LAB

Le centre du Ripault a signé un accord de laboratoire de recherche conventionné (LRC) intitulé Mécanique des composites à matrice céramique, soit (MC)2LAB, avec le laboratoire Roberval de l'université technique de Compiègne (UTC). Ce partenariat a pour objet d'approfondir les connaissances du CEA - DAM en matière de comportement mécanique multiéchelle des composites à matrice céramique et des composites à matrice organique pour l'établissement de lois de comportement fiables, notamment sous sollicitations mul-

ti-axiales en température. L'accord est entré en vigueur à compter du 1^{er} janvier pour une durée de quatre ans.

Lancement de la collaboration CEA-Canoe

Le centre du Ripault et la plateforme technologique Canoe (Centre technologique Nouvelle-Aquitaine des composites et des matériaux avancés), située en région Nouvelle-Aquitaine, ont signé un accord de collaboration de trois ans afin de lier leurs compétences dans les domaines des matériaux composites, de la plasturgie et de la fabrication additive. Cet accord, lancé le 24 janvier, permettra de développer des matériaux et procédés innovants pour les têtes nucléaires futures et les cibles pour le Laser Mégajoule.

LRC Desidix

Un nouvel accord de laboratoire de recherche commun, intitulé Desidix, pour Développement et études de systèmes innovants pour les diagnostics de l'infrarouge au domaine X, a été finalisé en fin d'année entre le CEA - DAM, l'Institut d'optique théorique et appliquée et le CNRS. Il permettra de renforcer et de structurer

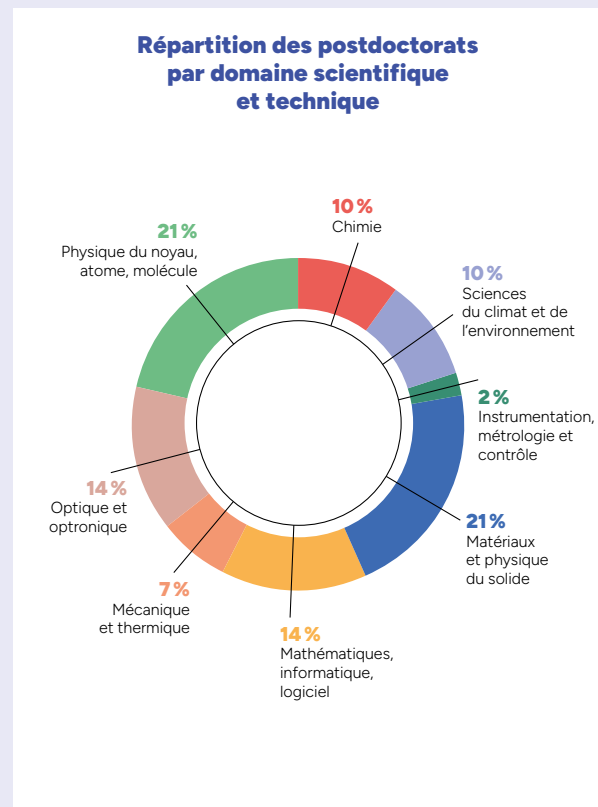
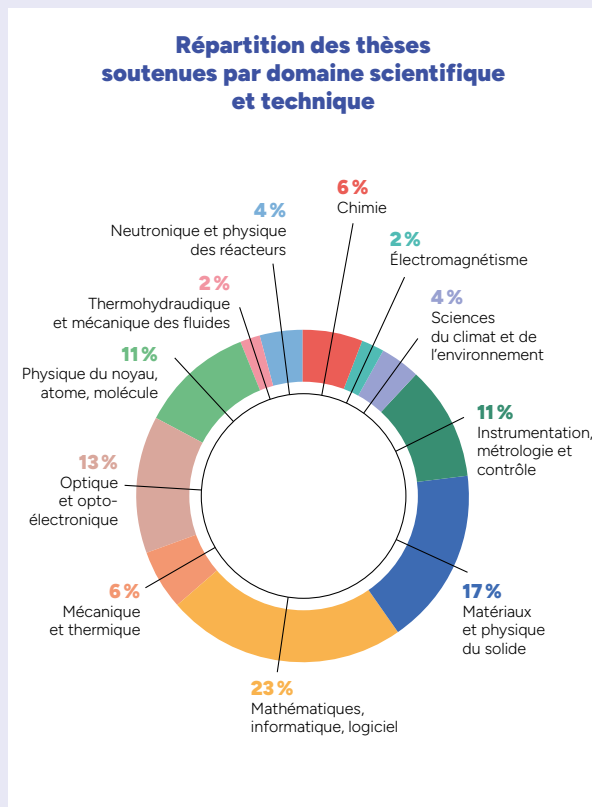
les études de recherche entre laboratoires dans de nombreux domaines innovants tels que la fabrication de nouveaux composants optiques, la conception de sources de rayonnements ou encore la réalisation de nouveaux systèmes de mesure. Des travaux communs seront également menés dans le domaine de la simulation numérique et du traitement du signal en intégrant de nouvelles méthodes basées sur l'intelligence artificielle.

Projet Taranis

Le projet Taranis, lancé à l'initiative de la société Thales dans le cadre de l'appel à projets France 2030 sur les réacteurs innovants, vise à concevoir et industrialiser un concept d'installation de production d'énergie basé sur la fusion par confinement inertiel laser. Un accord de partenariat a été signé le 13 février entre le CEA et GenF, la start-up créée par Thales pour mener à bien ce projet, dont la première phase est d'aboutir en trois ans à un avant-projet de dimensionnement de réacteur de confinement inertiel. Au CEA sont impliquées la DAM, la DRF, la DES, la DRT, ainsi que les unités mixtes de recherche Luli et Celia.

→ THÈSES SOUTENUES ET EN PRÉPARATION – POSTDOCTORATS

En 2025, 195 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 ; 47 l'ont soutenue au cours de l'année. Par ailleurs, 42 docteurs étaient en contrat postdoctoral (voir aux pages suivantes les listes des thèses soutenues et des postdoctorats).



→ PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

En 2025, le CEA - DAM a publié 392 articles et comptes rendus de conférence dans des journaux à comité de lecture, ainsi que 37 comptes rendus de conférence dans un livre ou dans une série (ISI-Web of Science, 01/06/2026).

→ HABILITATIONS À DIRIGER LES RECHERCHES (HDR)

Antonio COSCULLUELA

Centre du Cesta
Université de Bordeaux
Spécialité : mécanique.

Didier RAFFESTIN

Centre du Cesta
Université de Bordeaux
Spécialité : physique des plasmas.

**CHIMIE**

Maxime BLANCHON, *Formulation par évaporation-flash de spray et caractérisation de matériaux énergétiques composites*, université de Strasbourg.

Claire COUTIER, *Séparation des isotopologues de H₂ sur des zéolithes de type chabazite*, université de Bourgogne-Europe.

Ilwan MEIGNANT, *Développement d'une approche biomimétique écordable pour la remédiation raisonnée de sites pyrotechniques pollués*, Sorbonne Université.

ÉLECTROMAGNÉTISME, GÉNIE ÉLECTRIQUE

Chloé SCOTTI, *Vers la fiabilisation de la caractérisation non destructive de matériaux hétérogènes en hyperfréquences*, université d'Aix-Marseille.

INSTRUMENTATION, MÉTROLOGIE ET CONTRÔLE

Grégory LEFRERE, *Conception d'un système de vélocimétrie laser opérant dans le moyen infrarouge*, université de Rennes.

Sébastien MAQUEDA, *Développement d'un système interférométrique pour la mesure de surpression aérienne par rétroinjection optique*, Institut national polytechnique de Toulouse.

Lisa POIRIER-HERBECK, *Suivi dynamique par apprentissage et intelligence artificielle des signaux dédiés à la surveillance de l'environnement*, Centrale-Supélec.

Charles-Philippe MANO, *Développement de méthodes d'analyse de spectres gamma par démelange spectral pour la mesure nucléaire in situ*, université Paris-Saclay.

Jean-François MANLAY, *Machines à mesurer tridimensionnelles : contribution à l'évaluation des incertitudes*, université d'Angers.

MATÉRIAUX, PHYSIQUE DU SOLIDE

Julien PARIZE, *Simulation à l'échelle atomique des effets de déplacements dans les semi-conducteurs pour la microélectronique*, université Toulouse III Paul-Sabatier.

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

Océane AUBARD, *Développement de couches minces d'oxydes par pulvérisation cathodique magnétron pour les optiques des lasers de puissance*, université de Tours.

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.

Thimoté MENARD, *Élaboration et caractérisation de matériaux céramiques UHTC à renforts spécifiques pour la rentrée atmosphérique*, université de Bordeaux.

Amélie PÉROT, *4D printing of multi-stimuli responsive organic - inorganic hybrid materials: From nanotechnology to programmable devices*, Sorbonne Université.

Emmanuel CASTIEL, *Calcul quantique des transitions de phases du fer : influence du magnétisme et des corrélations électroniques*, université Paris-Saclay.

Rémi LEMAIRE, *Étude expérimentale et numérique de la cinétique des transitions microstructurales du fer pur*, université Paris-Saclay.

Olivier NADEAU, *Modélisation numérique de l'absorption d'hydrogène dans des hydrures métalliques*, université Paris-Saclay.

MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE SCIENTIFIQUE, LOGICIEL

Mickaël BOICHOT, *Caractérisation d'applications parallèles en vue d'un portage sur une architecture hétérogène multi-GPUs*, université Paris-Saclay.

Nicolas BOURDINEAUD, *Modélisation du dépôt d'énergie laser dans les céramiques et du choc hydrodynamique induit*, université de Bordeaux.

Paul BOURNAUD, *Génération de mailages hexaédriques structurés par blocs par recherche arborescente Monte-Carlo*, université d'Évry Paris-Saclay.

Morad BEN TAYEB, *Mise en œuvre de réseaux de neurones artificiels pour la simulation de problèmes de physique complexes : application à la physique des plasmas*, université de Bordeaux.

Roxane DELVILLE, *Traitement numérique des jonctions en décomposition de domaine pour les ondes*, Sorbonne Université.

Axelle DROUARD, *Kinetic methods for hyperbolic problems on unstructured meshes*, université Paris-Saclay.

Victor FOURNET, *Mathematical and numerical study of thick spray models*, Sorbonne-Université.

Victor GAYA, *Deep learning for SAR image enhancement: multi-modal fusion and interferometric estimation*, Telecom Paris.

Nadège POLETTE, *Contributions à des méthodes de bases réduites pour l'inférence bayésienne non paramétrique en géosciences*, Mines ParisTech.

Corentin STEFAN, *Schémas hydrodynamiques d'ordre élevé et cinétiques de changement de phase*, université de Montpellier.

Alexis TOUZALIN, *Méthode des éléments virtuels pour l'approximation de problèmes intégral-différentiels en électromagnétisme fréquentiel*, université de Toulouse III.

MÉCANIQUE ET THERMIQUE

Baptiste REYNIER, *Étude et modélisation d'impacts hypervéloces sur des matériaux et structures de satellites*, université de Bretagne.

Loïc SOMBAERT, *Transition en hypersonique sur BOLT*, IP Paris.

Émilien HAMON, *Endommagement, fragmentation et combustion d'un matériau explosif comprimé*, Insa Centre-Val de Loire.

NEUTRONIQUE ET PHYSIQUE DES RÉACTEURS

S. BERTHOLON*, *Développement d'une méthode d'évaluation des sources neutroniques en réacteur à eau légère*, université Aix-Marseille.

S. LAPAIRE*, *Calibration bayésienne à partir des mesures de taux de fission in-core pour la reconstruction de puissance des réacteurs à eau légère*, université Aix-Marseille.

OPTIQUE ET OPTRONIQUE

Yanis ABDELMOUMNI-PRUNES, *Description statistique de faisceaux partiellement cohérents – Applications à l'étude des instabilités laser-plasma*, université Paris-Saclay.

Océane AUBARD, *Réalisation de couches minces à fonctions optiques par pulvérisation cathodique magnétron*, université de Tours.

Solène BERTET, *Études des traitements GLAD pour les lasers de puissance*, Sorbonne Université.

Corentin DELANGLE, *Oscillateur Mamyshév pour la production d'impulsions ultracourtes énergétiques à haut taux de répétition*, université de Lille.

Quentin LABRO, *Modélisation théorique et numérique des instabilités faisceaux-plasmas relativistes par une approche quasi statique*, université Paris-Saclay.

Mathilde POTTIER, *Étude de la désexcitation radiative du noyau avec une méthode de type Oslo*, université Paris-Saclay.

PHYSIQUE DU NOYAU, ATOME, MOLÉCULE, PLASMAS

Florent BRUN, *Génération de rayonnement gamma à l'aide de lasers ultra-intenses*, université de Bordeaux.

Léa DOLLERSCHHELL, *Études théoriques, numériques et expérimentales des chocs dans les novae*, université Paris Sciences et Lettres.

Marin FONTAINE, *Étude expérimentale et numérique de processus de formation stellaire*, université Paris Sciences et Lettres.

Clément LACOSTE, *Conception optimisée et appliquée d'un dispositif accordable de focalisation et d'accélération de protons pour le laser Petal*, université de Bordeaux.

Diluka SINGAPPULI, *Études de l'équation d'état du bore et du nitru de bore à très haute pression par ondes de choc produites par laser*, université de Bordeaux.

SCIENCES DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT

Pierre ANDRAUD, *Estimation rapide des inondations et courants de tsunami à partir d'algorithmes de deep learning*, université Paris-Saclay.

Pierre LETOURNEL, *Les infrasons océaniques comme traceur de la dynamique de la moyenne atmosphère : évaluation des performances des modèles atmosphériques et assimilation de données pour la prévision numérique du temps*, Ponts ParisTech.

THERMOHYDRAULIQUE ET MÉCANIQUE DES FLUIDES

E. CHAVASSE-FRÉTAZ*, *Modélisation moyennée des transferts thermiques en ébullition haute pression*, Toulouse INP.



POSTDOCTORATS EN COURS EN 2025

CHIMIE

Nicolas JOUANDON, Synthèse de molécules énergétiques, Le Ripault.

Fanny GIGNAC, Caractérisation de nanoparticules d'actinides par la dispersion de Taylor et la focalisation isoélectrique capillaire, DAM Île-de-France.

Alexandre GROSSE, Synthèse de molécules énergétiques, Le Ripault.

Maxime PUYO, Recrystallisation de matériaux énergétiques, Le Ripault.

INSTRUMENTATION,
MÉTROLOGIE ET CONTRÔLE

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

Lisa POIRIER-HERBECK, Développement d'un système expert pour l'exploitation métrologique de capteurs spectrométriques, Valduc.

MATÉRIAUX, PHYSIQUE
DU SOLIDE

Houssem BOUSOURA, Identification de lois de comportement non linéaires à partir de mesures de champs en températures sur composites à matrice céramique, Laboratoire des composites thermostrostructuraux.

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.

Jaime de la FUENTE DIEZ, Développement d'algorithmes de machine learning nourris par des données de haute fidélité HTE pour l'oxydation d'amines, DAM Île-de-France.

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

Marco ECHEVARRIA IRARTE, Nucléation de dislocations en régime de hautes vitesses dans les métaux cubiques à faces centrées, DAM Île-de-France.

Adrien HELLIER, Développement de potentiels machine learning pour les effets de déplacement dans les semi-conducteurs, Cesta.

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

Baptiste LABONNE, Modélisation multi-échelle de la réponse mécanique de carbones denses anisotropes, DAM Île-de-France.

Ionna LYGATSIKA, Développement du code Abinit, DAM Île-de-France.

Étienne PANCHOUT, Revêtements optiques à base de multicouches d'oxydes déposés sous vide, Le Ripault.

Clément VUILLARD, Développement d'un procédé d'analyse d'atmosphères gazeuses par spectroscopie Raman, Valduc.

MATHÉMATIQUES,
INFORMATIQUE SCIENTIFIQUE,
LOGICIEL

Antoine BENDIMERAD-HOHL, Méthode parallèle en temps pour la simulation d'ondes électromagnétiques, Cesta.

Johann BOURHIS, Parallélisation d'une méthode de décomposition de domaine avec jonctions, Cesta.

Florent MICHENOT, Fusion de modèles 3D issus d'imagerie optique et radar, DAM Île-de-France.

Florian NOAL, Optimisation topologique multi-objectifs en mécanique non linéaire, Cesta.

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

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

MÉCANIQUE ET THERMIQUE

Camille GOUIN, Modélisation d'écoulements hypersoniques instationnaires, Cesta.

Flora LAHOUE, Développement de modèles mécaniques dans une chaîne de simulation aérothermique, Cesta.

Yoann RAFFRAY, Modélisation de l'interaction laser-matière pour la simulation des impacts hypervéloces, Cesta.

OPTIQUE ET OPTRONIQUE

Maxime ADOLPHE, Apprentissage automatique de stratégies d'assemblage mécanique, Cesta.

Cloë DESBORDES, Impact de la pollution sur les performances des amplificateurs sur le LMJ, Cesta.

Fiammetta FRICANO, Dosimétrie par fibres – Effet des neutrons, Cesta.

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.

Martin ROCHE, Dosimétrie par fibres – Effet des X, Cesta.

PHYSIQUE DU NOYAU, ATOME,
MOLÉCULE, PLASMAS

Khalil ALIANE, Adaptation de cibles héli-coïdales aux lasers en cadence pour l'accélération d'ions, Cesta.

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

Gabriel BARREAU, Développement d'outils numériques appliqués à l'étude de la dynamique des plasmas magnétisés, DAM Île-de-France.

Mathias DESSEAUX, Étude ab initio des transitions de phases dans les intérieurs planétaires, 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.

Antia GRANA-GONZALES, Étude de la fission avec Pista 2 et Vamos au Ganil, DAM Île-de-France.

Aurélia MAÏOLO, Conception de cibles FCI pour la production d'énergie, Cesta.

Paul PROUST, Optimisation et régularisation automatique de cartes d'énergie potentielle, DAM Île-de-France.

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

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

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



R. Capdessus, C. Ruyer, P. Loiseau, P.-É. Masson-Laborde CEA - DAM, centre DAM Île-de-France
A. Debayle Focused Energy, Allemagne

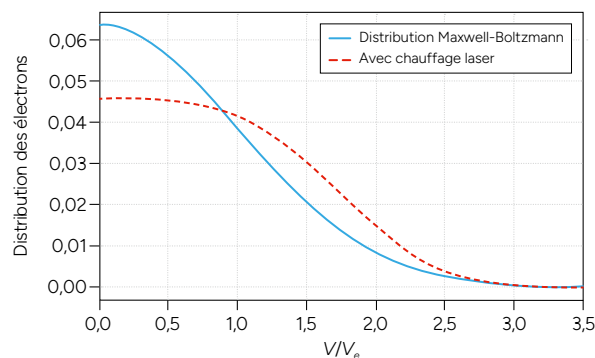
Fusion inertielle : comprendre les collisions pour dompter les ondes du plasma

Réussir la fusion nucléaire par confinement inertielle exige de comprendre le plus rigoureusement possible la dynamique des ondes et des particules au sein du plasma de fusion. Une équipe du CEA - DAM a démontré que la prise en compte des collisions entre particules – souvent simplifiée jusqu’ici – détermine de manière significative la propagation des ondes acoustiques [1]. Ces résultats affineront l’interprétation des expériences menées sur le Laser Mégajoule.

La fusion nucléaire par confinement inertielle consiste à recréer les conditions de pression et de température du cœur du Soleil en comprimant une cible à l’aide de lasers de haute puissance. La cible est composée d’une cavité en or contenant une capsule de combustible deutérium-tritium en son centre. Les faisceaux laser focalisés sur la cavité génèrent un plasma d’or qui réémet un rayonnement X, lequel comprime le combustible. Toutefois, l’interaction entre le laser et la cavité est régie par divers phénomènes ondulatoires. Les ondes acoustiques, notamment, peuvent engendrer des instabilités détournant l’énergie et compromettant donc la réussite de l’expérience. De plus, elles menacent les optiques de l’installation. Aussi, prédire leurs propriétés avec précision est donc crucial.

Ce qui se passe dans un plasma du Laser Mégajoule lorsqu’il est chauffé par laser est complexe. Le plasma est formé d’ions et d’électrons, et il absorbe le rayonnement laser. Mais dans les calculs, on ne peut pas suivre la trajectoire de chaque électron ou de chaque ion. Aussi, on utilise une approche statistique : on regarde comment les vitesses des particules se répartissent en moyenne. La grandeur obtenue est la fonction de distribution de vitesse, qui indique combien de particules ont telle ou telle vitesse. On calcule ensuite comment cette fonction de distribution évolue lorsqu’on éclaire

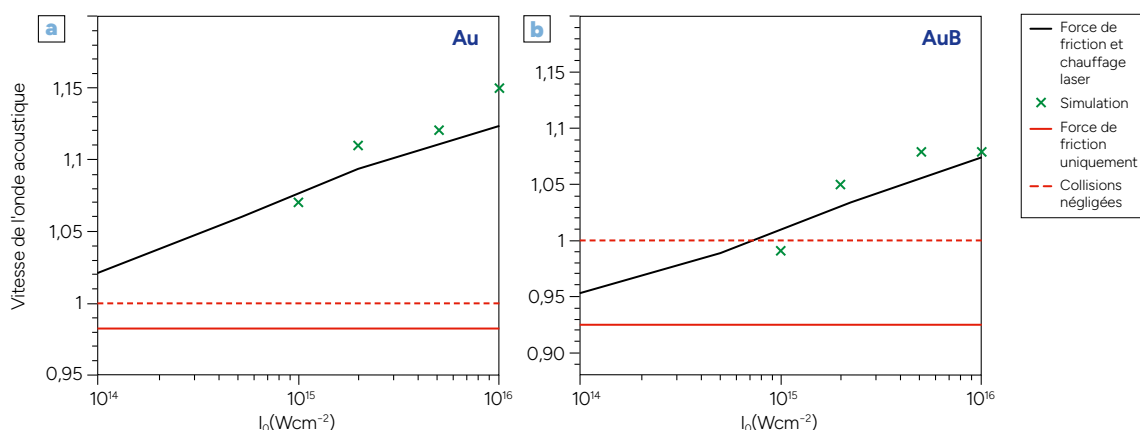
FIGURE 1



→ Influence du chauffage laser sur la fonction de distribution des vitesses des électrons. En **bleu** (trait plein), distribution sans chauffage laser, en **rouge** (tirets) avec chauffage laser. Le chauffage laser tend à élargir la distribution des électrons. L’axe des abscisses représente la vitesse des électrons divisée par la vitesse thermique des électrons (v_e), représentative de leur agitation thermique au sein du plasma.

le plasma avec un laser. Comprendre cette fonction de distribution est indispensable pour étudier les ondes acoustiques dans le plasma, puisqu’elle détermine la vitesse de ces ondes et leur amortissement au cours du temps.

FIGURE 2



→ Vitesses normalisées de l'onde acoustique, en fonction de l'intensité laser. [a] cas d'un plasma d'or pur [Au] et [b] d'un mélange or-bore [AuB]. Les courbes noires représentent les résultats de notre modèle analytique intégrant simultanément le chauffage laser et la force de friction. Les croix vertes correspondent aux valeurs obtenues des simulations numériques.

Le chauffage laser, via les collisions électron-ion, déforme la fonction de distribution des électrons tandis que les collisions électron-électron la font revenir vers son état de base. Mais il existe un autre effet, non lié au chauffage du plasma par le laser : les forces de friction entre ions et électrons. Or, jusqu'à présent, les modélisations du plasma ne considéraient souvent que l'un ou l'autre, quand, dans un plasma, les deux effets jouent simultanément. C'est pourquoi notre modélisation prend en compte le chauffage laser et la friction.

Les résultats obtenus révèlent un comportement surprenant : les effets collisionnels évoqués précédemment modifient fortement la vitesse des ondes acoustiques et leur amortissement. Ces ondes acoustiques possèdent une vitesse assez faible et sont affectées essentiellement par les particules de même vitesse. Or, le chauffage laser réduit le nombre d'électrons de faible vitesse (FIGURE 1), donc réduit le nombre d'électrons susceptibles de ralentir et d'amortir les ondes acoustiques. Autrement dit, en chauffant le plasma, on réduit l'amortissement des ondes acoustiques.

La composition du plasma joue aussi un rôle sur les ondes acoustiques. Dans le cas d'un plasma d'or, les noyaux d'or sont très lents, leur vitesse est bien plus faible que celle des ondes acoustiques. Ils amortissent donc peu ces dernières. Mais si on ajoute du bore, dont la vitesse thermique (représentative de l'agitation thermique des électrons dans le plasma) est proche de celle des ondes acoustiques, on observe dans nos simulations un amortissement beaucoup plus élevé par rapport au cas de l'or où seuls les électrons contribuent à l'amortissement de l'onde.

Cette maîtrise de l'amortissement des ondes est un levier direct pour limiter les instabilités, qui sont l'un des obstacles majeurs à une fusion efficace.

Notre modèle analytique (courbes noires, FIGURE 2), corroboré par des simulations sur les supercalculateurs du CEA-DAM, s'avère efficace pour les plasmas avec un ou plusieurs types de noyaux. Il montre que l'ajout de bore, en amortissant les ondes acoustiques, réduirait les risques d'abîmer les installations du Laser Mégajoule.

La validation de ce modèle analytique a nécessité des simulations cinétiques particulièrement gourmandes en ressources informatiques. Ces calculs, qui suivent l'évolution de millions de particules dans l'espace des phases, ont mobilisé les architectures massivement parallèles du centre de calcul du CEA-DAM. La très bonne adéquation entre nos équations théoriques et ces expériences numériques confirme la validité de notre approche. Elle garantit une description fiable des processus de dissipation énergétique, indispensable pour anticiper finement le comportement du plasma sous flux laser intense. Prochaine étape : prendre en compte les inhomogénéités locales et les points chauds de la tache du laser, afin de modéliser fidèlement la dynamique des ondes acoustiques du plasma, et être plus proches des configurations expérimentales du Laser Mégajoule.

RÉFÉRENCES

1. R. Capdessus, C. Ruyer, A. Debayle, P. Loiseau, P.-É. Masson-Laborde « Influence of collisional effects on ion-acoustic wave properties in non-maxwellian laser-driven plasmas », *Phys. Rev. Lett.*, **135**, 125101 (2025).
2. J. Ralph, A. Kemp, N. B. Meezan, R. L. Berger, D. Strozzi et al. « The effects of multispecies Hohlraum walls on stimulated Brillouin scattering, Hohlraum dynamics, and beam propagation », *Phys. Plasmas*, **28**, 072704 (2021).



L. Lecherbourg, C. Blancard, P. Cossé, G. Faussurier, L. Gremillet, O. Poujade, C. Reverdin CEA - DAM, centre DAM Île-de-France et Laboratoire matière en conditions extrêmes, université Paris-Saclay – CEA, Bruyères-le-Châtel
A. Chaleil, B. Loupias, J.-C. Pain, P. Renaudin CEA - DAM, centre DAM Île-de-France
S. Baton, L. Duthoit, F. Pérez Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (Luli), UMR 7605 CNRS – CEA – Sorbonne Université – École polytechnique, Palaiseau

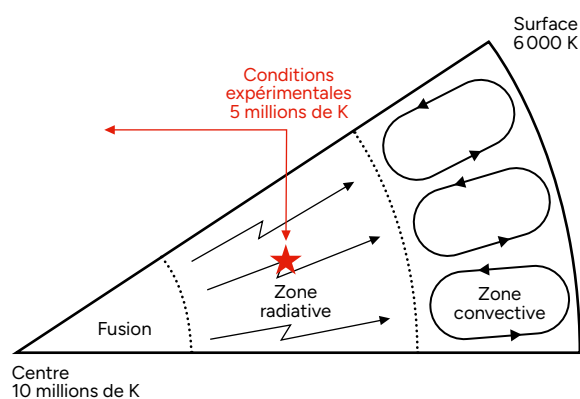
Reproduire en laboratoire les mélanges de matière caractéristiques du Soleil

Focaliser un laser ultra-intense sur des cibles conçues à cet effet permet d'étudier la matière représentative de l'intérieur du Soleil. En jouant sur leurs compositions, il est possible d'étudier les processus gouvernant l'évolution de cette matière extrêmement dense et chaude, et de tester ainsi la capacité prédictive du code de simulation utilisé au CEA - DAM [1].

Le Soleil qui nous éclaire et nous réchauffe en rayonnant a beau être étudié depuis longtemps, les physiciens ne parviennent toujours pas à reproduire par le calcul l'intégralité des observations astronomiques. Entre son cœur, où les réactions de fusion nucléaire font monter la température à dix millions de degrés, et sa surface à six mille degrés, la chaleur est évacuée d'abord par rayonnement, puis par convection (FIGURE 1). Grâce aux nombreuses observations, on sait qu'il existe une frontière entre la zone radiative et la zone convective, mais les calculs ne parviennent pas à restituer sa position. En cause : notre possible méconnaissance de certaines propriétés de la matière dans une telle fournaise.

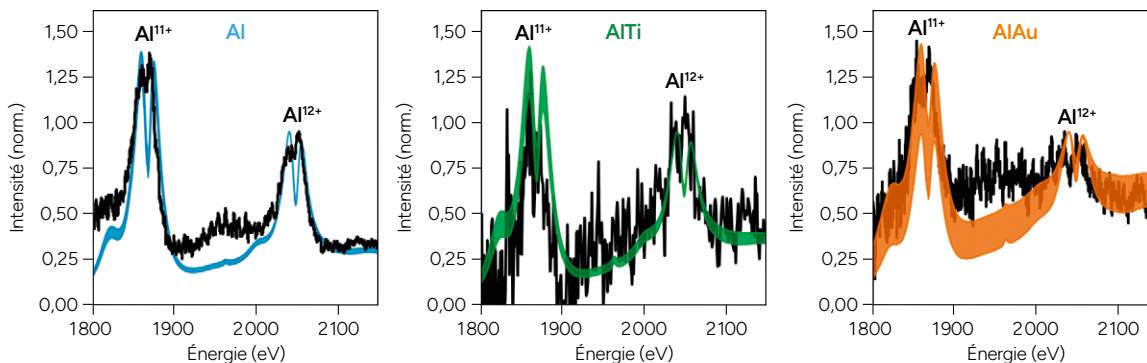
Pour y remédier, nous sommes aujourd'hui capables de porter en laboratoire la matière aux conditions régnant à l'intérieur du Soleil et de mesurer son comportement. En particulier, comme la zone radiative est composée de nombreux atomes différents, nous nous intéressons aux effets de mélange qui pourraient être mal pris en compte dans les calculs. Plus précisément, nous comparons les valeurs mesurées et calculées de l'intensité du rayonnement dans trois situations : de l'aluminium seul

FIGURE 1



→ Représentation du soleil vu en coupe du centre à sa surface. La frontière entre les zones radiative et convective reste mal restituée par le calcul en raison d'une certaine méconnaissance des propriétés radiatives ou de la composition de la matière stellaire. L'utilisation d'un laser ultra-intense couplé à des cibles représentatives de la matière stellaire rend possible le test en laboratoire des mélanges de matériaux dans ces conditions extrêmes (plusieurs millions de degrés). La mesure des émissions de rayonnement X de ces cibles permet de remonter aux propriétés radiatives de la matière.

FIGURE 2



→ Comparaison des mesures de spectres d'émission (courbes noires) avec les simulations numériques (courbes de couleur) pour de l'aluminium, un mélange d'aluminium et de titane et un mélange d'aluminium et d'or. Les simulations restituent la hauteur et la largeur des pics, correspondant à l'émission de rayonnement X de l'ion aluminium ionisé onze et douze fois, mais assez mal la zone intermédiaire : la cible émet plus que prévu.

(Al), un mélange d'aluminium et de titane (AlTi), et un mélange d'aluminium et d'or (AlAu). Les différences observées (FIGURE 2) nous permettent de mettre en évidence les forces et les faiblesses de nos calculs et de tester la validité de certains de leurs ingrédients.

Certains lasers, dits ultra-intenses et ultracourts, permettent de déposer en quelques picosecondes – soit le milliardième d'un clignement d'œil –, une quantité d'énergie de quelques joules dans une cible d'une dizaine de microns de diamètre, soit le dixième de l'épaisseur d'un cheveu. Cette formidable densité d'énergie conduit à des températures pouvant dépasser la dizaine de millions de degrés, transformant le milieu initialement solide en un plasma dense et fortement ionisé. Il s'agit alors de mesurer le rayonnement X émis avec la meilleure précision.

La structure des cibles – pulvérisées à chaque tir laser – permet de contraindre les processus physiques mis en jeu. En effet, la matière à étudier est incluse dans une matrice en plastique, ce qui limite son expansion une fois chauffée et maintient une densité élevée pendant les premières dizaines de picosecondes. En ajoutant à l'aluminium du titane ou de l'or, nous modifions les effets dus à la densité initiale ou aux propriétés radiatives du plasma.

Pour caractériser l'émission de rayonnement X du plasma, nous avons développé trois détecteurs. Chacun est dédié à une mesure particulière : résolue en temps, en espace ou spectralement. Ces mesures permettent d'extraire une durée d'émission, le diamètre de la zone émissive ainsi que la position et l'intensité des raies spectrales.

Nous avons ensuite effectué de nombreuses simulations à l'aide du code Troll du CEA-DAM, en faisant varier la principale inconnue : l'énergie déposée dans la cible. Pour chaque type de cible (aluminium, aluminium-titane, aluminium-or), un choix d'ingrédients dans les simulations permet de restituer simultanément les trois mesures. La FIGURE 2 compare les

mesures de spectres d'émission (courbes noires) avec ces simulations (courbes de couleur). Les mesures présentent deux pics composites, correspondant à l'émission de rayonnement X de l'ion aluminium ionisé onze et douze fois. L'allure des courbes nous renseigne sur la densité et la température du milieu chauffé. Les comparaisons sont satisfaisantes quant à la hauteur et à la largeur des deux pics. En revanche, le signal de fond entre ces derniers est sous-estimé par le calcul.

Ainsi, bien que l'énergie déposée dans le mélange aluminium-or soit plus importante que dans l'aluminium seul, le mélange est plus froid (2 millions de degrés contre 9 millions) du fait de l'augmentation de l'émission radiative apportée par la présence de l'or ($Z = 79$ contre 13 pour l'aluminium). En revanche, dans ces conditions de température, le titane ($Z = 22$) influe peu sur l'émission radiative ; c'est ici l'augmentation de la densité initiale par rapport à celle de l'aluminium seul qui pilote l'évolution thermique de la cible.

Cette expérience a démontré la possibilité de tester les effets de mélange dans des plasmas chauffés par laser ultra-intense. À l'avenir, nous pourrions nous rapprocher davantage encore des mélanges stellaires en ajustant les paramètres du laser et la composition des cibles. Le fer, notamment, joue un rôle clé dans ces mélanges, et des expériences sont prévues pour l'étudier.

RÉFÉRENCES

1. L. Lecherbourg, S. Baton, C. Blancard, A. Chaleil, P. Cossé, L. Duthoit, G. Faussurier, L. Gremillet, B. Loupias, J.-C. Pain, F. Pérez, O. Poujade, C. Reverdin, P. Renaudin « Plasma dynamics of an Al plasma in AlTi or AlAu mixtures heated by the PICO2000 ultra-intense laser pulse », *Phys. Plasmas*, doi : 10.1063/5.0272025, **32**, 092706 (2025).



G. Sary, W. Cayzac, X. Davoine CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

N. Blanchot CEA - DAM, centre du Cesta

A. Chobriat, J. Thibert, J. Schunck CEA - DAM, centre de Valduc

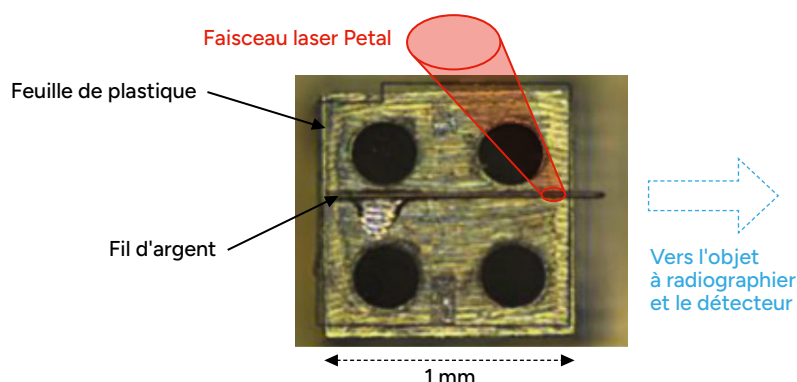
Sonder la matière comprimée avec des rayons X créés par laser

Une équipe pluridisciplinaire du CEA - DAM a mis au point une source de rayons X pour imager les entrailles d'échantillons de matière portés à très haute pression. Grâce à une démarche couplant expériences laser et simulations numériques [1], elle est parvenue avec succès, dans le cadre du programme Simulation, à exploiter le faisceau laser ultra-intense Petal sur l'installation Laser Mégajoule pour réaliser des radiographies d'objets comportant des motifs de dimension micrométrique.

Sur le principe des radiographies médicales, il est possible de sonder tout objet grâce à des rayons X. Ceux-ci le traversent en interagissant avec lui, puis impriment une plaque radiographique. L'exploitation de celle-ci donne accès aux propriétés de la matière. Les informations que l'on déduit de telles radiographies sont importantes pour analyser les expériences menées sur le Laser Mégajoule.

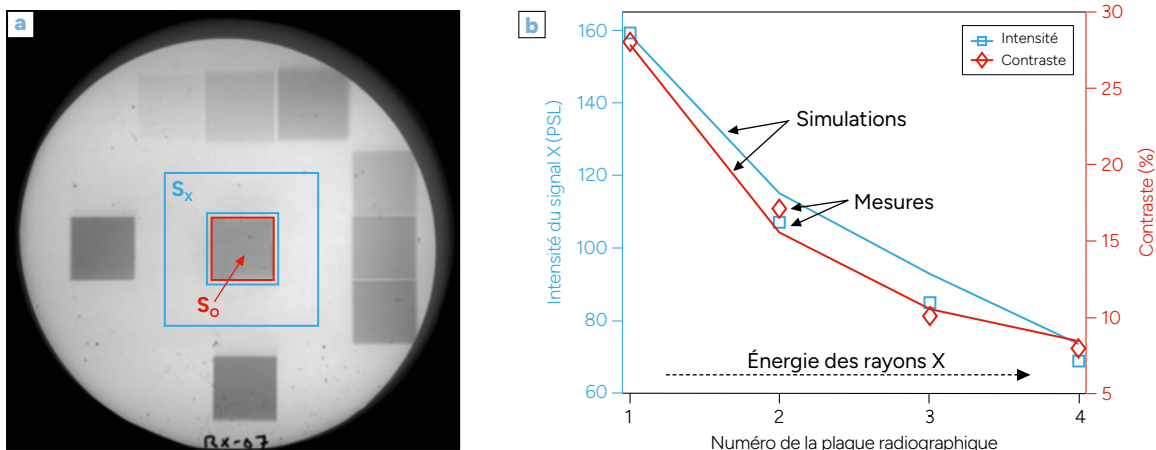
Rappelons que, grâce à cette installation, il est possible de comprimer de manière intense et soudaine, sur une durée de l'ordre de quelques nanosecondes (10^{-9} s), un objet de dimensions millimétriques. Réaliser des radiographies d'un objet dans de telles conditions ne peut se faire qu'à l'aide de sources de rayons X bien particulières: la brièveté temporelle et les dimensions microscopiques des phénomènes que l'on souhaite observer requièrent

FIGURE 1



→ Photographie de la cible conçue pour produire les rayons X de radiographie lors de l'irradiation par le laser Petal. Elle est constituée d'une feuille de plastique sur laquelle est collé un mince fil d'argent, ici de 25 μm . Les rayons X sont issus de l'interaction entre le faisceau de Petal et ce fil. Les quatre disques noirs sont des points de colle de maintien de la cible.

FIGURE 2



→ [a] Radiographie expérimentale d'un jeu de plots métalliques. Les zones sombres (S_o par exemple) correspondent aux ombres portées des plots sur la plaque radiographique. [b] Comparaison des intensités et des contrastes mesurés et calculés par simulation dans la zone claire S_x (en unités PSL pour *photostimulated luminescence*). Expérimentalement, un empilement de plaques radiographiques permet de capter des images à différentes énergies de rayons X. L'accord des mesures et des simulations sur quatre plaques radiographiques est excellent.

un flash X extrêmement bref, d'une durée de l'ordre de ou inférieure à la dizaine de picosecondes (10^{-12} s), et une dimension de source inférieure à quelques dizaines de micromètres (10^{-6} m) afin de produire une image bien résolue spatialement.

Pour ces expériences, la source des rayons X est produite grâce au laser Petal (Petawatt Aquitaine Laser) qui illumine une cible spécialement conçue, représentée sur la FIGURE 1. Couplé au Laser Mégajoule, le laser Petal se distingue des autres faisceaux laser de l'installation par sa brièveté (la durée de l'impulsion est mille fois plus courte que celle des autres faisceaux), la petite extension de la zone illuminée (cinquantaine de micromètres) et sa très grande intensité (plus de mille fois supérieure à celle des autres faisceaux). Cette dernière caractéristique permet à Petal d'arracher un grand nombre d'électrons à la cible illuminée, puis de les accélérer à très grande vitesse. Ces électrons, en cheminant dans la matière, conduisent par effet Bremsstrahlung à l'émission des rayons X recherchés pour les expériences de radiographie.

Pour cette expérience, la cible créant la source de rayons X se compose d'une feuille de plastique sur laquelle est collé un mince fil d'argent d'une épaisseur de 25 micromètres. En principe, les phénomènes physiques qui fondent le fonctionnement de la source X sont bien compris. Cependant, dans le domaine des grandes installations laser, rien n'est tout à fait simple : par exemple, pointer le laser Petal sur le fil nécessite une précision équivalente à celle de viser une tête d'épingle à une distance de 500 mètres ! On comprend que face à une telle exigence de précision, le laser puisse ne pas être parfaitement pointé sur le fil à chaque tir. Heureusement, la feuille de plastique permet de récupérer la majeure partie de l'énergie laser : des électrons rapides y sont produits

et leur interaction avec le fil engendre aussi des rayons X. Afin de caractériser la source de rayonnement, celle-ci a été employée pour radiographier un ensemble de plots métalliques. Cette expérience simple permet d'évaluer les propriétés de la source, comme sa dimension ou son intensité dans un contexte bien maîtrisé. La radiographie expérimentale obtenue est illustrée sur la FIGURE 2a.

Néanmoins, même dans ces conditions idéalisées, réaliser des expériences sur un grand laser comme Petal est coûteux en temps et en ressources. La simulation numérique permet de mieux comprendre les résultats expérimentaux en donnant accès à des informations microscopiques sur le plasma à l'origine du rayonnement X. Elle permet aussi de prévoir les images radiographiques en fonction des paramètres du laser Petal, et donc de réduire le nombre d'expériences préparatoires. Pour ce faire, nous avons utilisé les codes de calcul Troll et Calder, tous deux développés au CEA-DAM, ainsi que Geant4, un code du Cern librement accessible, pour décrire l'ensemble du processus de radiographie. Nous avons ainsi démontré non seulement les bonnes propriétés de la source pour produire des clichés radiographiques de qualité, mais aussi l'accord entre prédictions et mesures (FIGURE 2b) [1]. Cette source sera désormais disponible pour les expériences sur l'installation Laser Mégajoule-Petal, en particulier dans le cadre de son programme d'ouverture académique.

RÉFÉRENCES

- [1] G. Sary et al. « Experimental and numerical characterization of high-energy point-like x-ray sources for radiography applications at the LMJ-PETAL laser facility », *Physics of Plasmas*, **32**, p. 043301 (2025).



J.-P. Ebran CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

B. Bally CEA - DAM et DRF, Espace de structure nucléaire théorique, Saclay

T. Duguet, V. Soma CEA - DRF, Saclay

Néon 20 : un noyau en forme de quille pour sonder la matière de l'Univers primitif

À la suite d'une prévision théorique du CEA - DAM, en 2025, le Cern, laboratoire regroupant presque toutes les nations du monde, a modifié le programme de son grand accélérateur situé à la frontière franco-suisse. Les calculs prévoient que la forme du noyau de néon 20, comportant vingt protons et neutrons, laisse une trace mesurable dans les particules émises après collision [1]. Les grands détecteurs du Cern se sont alors focalisés sur ces collisions. Les premiers résultats ont confirmé les attentes : pour la première fois, la géométrie interne d'un noyau léger a été reliée quantitativement à des observations.

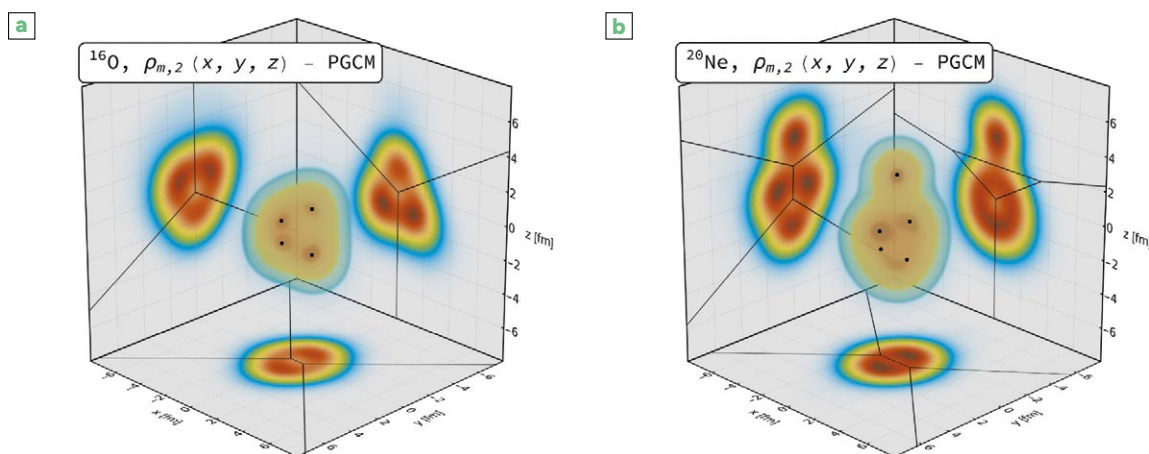
Pour comprendre l'enjeu de ces travaux, il faut se rappeler ce qui se produit lorsqu'on fait entrer en collision deux noyaux d'atomes à des vitesses proches de celle de la lumière. Pendant un instant extrêmement bref se forme un état de la matière appelé plasma de quarks et de gluons. On peut l'imaginer comme une « soupe » extrêmement chaude et dense dans laquelle les briques élémentaires – quarks et gluons – des protons et des neutrons constituant un noyau d'atome ne sont plus confinées à l'intérieur des noyaux. Cet état aurait rempli l'Univers quelques microsecondes après le Big Bang. L'étudier permet donc d'éclairer la manière dont la matière s'est organisée dans les tout premiers instants de l'Univers. Après sa formation, ce plasma se dilate, se refroidit, puis se reconvertit en particules ordinaires que les détecteurs enregistrent et analysent.

Cette dilatation ressemble à l'expansion d'un fluide comprimé qui se détend : l'ensemble du système évolue de façon coordonnée. Les directions dans lesquelles les particules finales sont émises gardent ainsi la mémoire de la forme initiale de la zone de collision. Pour des noyaux lourds, cette image d'une expansion organisée est bien établie. En revanche, lorsque les noyaux sont petits, la

situation devient plus délicate. Le système contient peu de constituants et de légères différences dans la position initiale des nucléons peuvent modifier sensiblement le résultat. Ces variations d'un événement à l'autre, appelées fluctuations, brouillent les signatures et rendent l'interprétation plus incertaine : il devient difficile de savoir si l'on observe réellement un mouvement d'ensemble du système ou simplement des effets individuels.

Pour dépasser cette difficulté, nous avons choisi une stratégie simple dans son principe : comparer deux noyaux légers presque identiques par leur masse, mais très différents par leur forme. L'oxygène 16 est plutôt compact, tandis que le néon 20 présente une géométrie allongée bien connue des physiciens nucléaires (FIGURE 1), qui rappelle une quille. L'idée est que, si deux systèmes ont la même taille, mais pas la même forme, toute différence observée dans les particules finales peut être attribuée à cette géométrie. En s'intéressant surtout à l'écart entre les deux situations, une grande partie des fluctuations s'annule. C'est là que réside le résultat marquant de ce travail : la forme microscopique d'un noyau, calculée théoriquement, se retrouve dans la répartition des particules mesurées après une collision à très haute énergie.

FIGURE 1



—> Distribution de matière dans [a] l'oxygène 16 et [b] le néon 20, issue des calculs effectués avec la méthode dite des coordonnées génératrices projetées. La forme tétraédrique de l'oxygène 16 et celle en quille du néon 20 apparaissent clairement ; ces différences de forme peuvent s'observer indirectement dans les collisions à haute énergie, comme le Cern l'a confirmé expérimentalement peu après la publication de notre prévision théorique.

Pour décrire cette forme avec précision, nous avons employé deux méthodes de calcul indépendantes. Parmi elles, la méthode dite des coordonnées génératrices projetées, formulée dans le cadre d'une collaboration entre physiciens nucléaires de trois directions du CEA (DAM, DES, DRF), a été déployée sur le supercalculateur Topaze du Très Grand Centre de calcul, situé sur le site du centre DAM Île-de-France. Ces calculs produisent de véritables cartes de la répartition de la matière à l'intérieur des noyaux, qui servent ensuite de point de départ à des simulations complètes de collisions. Les simulations indiquent que la forme allongée du néon 20 devrait produire une anisotropie légèrement plus marquée dans la distribution finale des particules que l'oxygène 16, avec un écart de l'ordre de 10 à 15 %, suffisamment important pour être mesuré [1].

La clarté de cette prévision a conduit le Cern à adapter le calendrier de son grand accélérateur de 27 km de long (LHC, pour *Large Hadron Collider*). À l'été 2025, des collisions néon-néon ont été programmées immédiatement après les collisions oxygène-oxygène déjà prévues. Les quatre grands détecteurs installés sur le faisceau ont analysé ces données. Les premiers résultats rendus publics [2-5] montrent une évolution conforme aux attentes théoriques. Autrement dit, la forme du noyau initial apparaît indirectement dans les mesures finales, ce qui constitue un jalon important dans l'étude de la matière nucléaire à haute énergie.

Au-delà du seul cas du néon 20, cette avancée ouvre plusieurs perspectives. Les collisions à très haute énergie deviennent un moyen indirect de sonder l'organisation interne des noyaux, complémentaire des méthodes traditionnelles de physique nucléaire. Elle permet également de tester jusqu'à quelle taille un système nucléaire peut évoluer

comme un ensemble coordonné plutôt que comme une collection de particules indépendantes. Enfin, cette approche instaure une méthode de comparaison entre systèmes voisins qui réduit fortement les incertitudes et établit un pont direct entre la physique nucléaire dite de basse énergie, centrée sur la structure des noyaux, et la physique des hautes énergies étudiée avec les grands accélérateurs.

En montrant qu'un détail de structure nucléaire peut être « lu » dans des collisions à des énergies extrêmement élevées, ces travaux transforment ainsi les accélérateurs en instruments de précision capables non seulement de recréer la matière des premiers instants de l'Univers, mais aussi d'éclairer l'organisation intime des noyaux d'atome.

RÉFÉRENCES

- 1 — **G. Giacalone et al.** « Exploiting ^{20}Ne isotopes for precision characterizations of collectivity in small systems », *Phys. Rev. Lett.*, **135**, 012302 (2025).
- 2 — **The ATLAS collaboration** « Measurement of the azimuthal anisotropy of charged particles in $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ and $^{20}\text{Ne}+^{20}\text{Ne}$ collisions with the ATLAS detector », [arXiv:2509.05171](https://arxiv.org/abs/2509.05171) (2025).
- 3 — **The ALICE collaboration** « Evidence of nuclear geometry-driven anisotropic flow in OO and NeNe collisions », [arXiv:2509.06428](https://arxiv.org/abs/2509.06428) (2025).
- 4 — **The CMS collaboration** « Observation of long-range collective flow in OO and NeNe collisions and implications for nuclear structure studies », [arXiv:2510.02580](https://arxiv.org/abs/2510.02580) (2025).
- 5 — **The LHCb collaboration** « Unveiling the shape of the ^{20}Ne nucleus by measuring the flow coefficients with cumulants in PbNe and PbAr collisions », [arXiv:2509.12399](https://arxiv.org/abs/2509.12399) (2025).



P. Morfouace, J. Taieb, A. Chatillon, B. Mauss, G. Blanchon, N. Dubray, N. Pillet, D. Régner CEA - DAM, centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay, Laboratoire matière en conditions extrêmes, Bruyères-le-Châtel

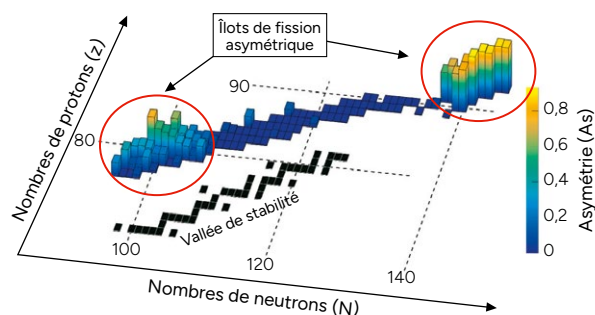
Fission nucléaire : découverte d'un nouvel îlot de fission asymétrique

Une collaboration internationale menée par une équipe du CEA - DAM vient de montrer l'existence, contre toute attente, d'une nouvelle région de fission asymétrique dans la carte des noyaux atomiques [1]. Elle révèle le mécanisme à l'origine de cette fission asymétrique, distinct de celui observé dans la fission asymétrique connue de noyaux comme l'uranium. Alors que le noyau se divise en deux fragments, le premier mécanisme est gouverné par le fragment léger et le second par le fragment lourd.

Lorsqu'un noyau atomique fissionne, il se scinde en deux noyaux plus légers, appelés fragments, libérant une quantité d'énergie considérable. D'abord comparée à la division d'une goutte liquide, la fission nucléaire a ensuite été appréhendée en prenant en compte les aspects microscopiques du phénomène. Malgré sa découverte il y a plus de 85 ans, l'imbrication entre effets macroscopiques et microscopiques reste une question ouverte.

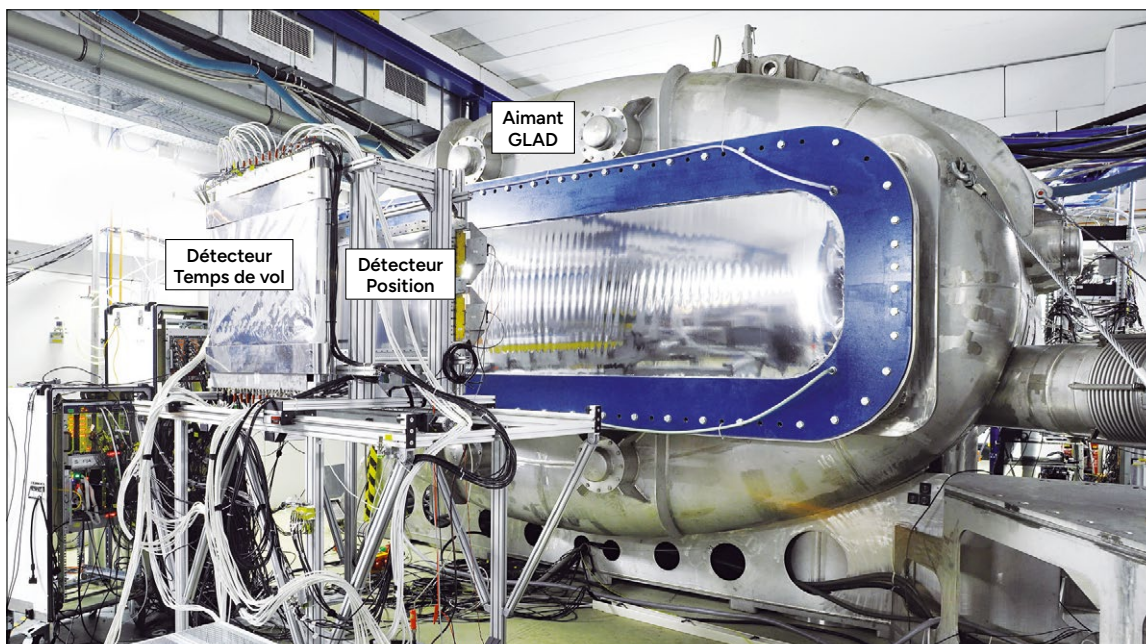
Comprendre la formation des fragments de fission est important pour l'énergie nucléaire et la sûreté des réacteurs, pour certains processus astrophysiques, et aussi pour le programme Simulation du CEA-DAM. Les données expérimentales se concentrent principalement dans la région des noyaux stables, existant sur Terre, représentés en noir sur la FIGURE 1. La carte des noyaux sur cette figure les classe en fonction du nombre de protons et de neutrons qu'ils comportent; les noyaux stables sont regroupés dans la «vallée de stabilité» et sont les mieux connus. Pour la fission, les noyaux étudiés comme l'uranium sont très lourds et quasi stables: ils sont regroupés dans un «îlot de fission» autour de 90 à 100 protons et 140 neutrons. En revanche, les données expérimentales manquent pour certains noyaux, riches ou déficients en neutrons, alors qu'ils sont cruciaux

FIGURE 1



→ Carte des noyaux atomiques, classant les noyaux en fonction du nombre de protons et de neutrons qu'ils comportent; la vallée dite de stabilité apparaît en noir. Les noyaux qui ont été étudiés dans nos expériences, près de Darmstadt, sont représentés par des barres verticales; l'asymétrie mesurée pour chacun est indiquée. Nos données mettent en évidence deux «îlots» de fission asymétrique, séparés par une région de fission symétrique. L'îlot en haut à droite correspond à la fission asymétrique bien connue des actinides (uranium, etc., 89 à 103 protons), stabilisée par le fragment le plus lourd (xénon, $Z = 54$). L'îlot en bas à gauche indique la région de fission asymétrique récemment découverte de noyaux situés dans la région autour du mercure (80 protons), stabilisée par le fragment léger (krypton, $Z = 36$).

FIGURE 2



—> Photographie du grand aimant supraconducteur R3B Glad, ainsi que des détecteurs de grande surface situés en aval. La fission est induite par excitation coulombienne en amont de l'aimant. Celui-ci dévie les fragments de fission vers les détecteurs qui permettent la mesure de leur trajectoire et de leur temps de vol, conduisant à la détermination de leur masse.

pour les applications mentionnées précédemment et pour le programme Simulation. Des prévisions théoriques sont disponibles, mais leur validation passe par la confrontation à l'expérience.

On sait que les noyaux très lourds et quasi stables, comme l'uranium, se divisent préférentiellement de manière asymétrique, c'est-à-dire en deux fragments de masses différentes. Il était par contre admis que les noyaux plus légers se scindaient de façon symétrique en deux fragments quasi identiques. Et pourtant, des expériences ont récemment révélé une division asymétrique de noyaux déficients en neutrons, formant un îlot autour de 80 protons et 100 neutrons (FIGURE 1). Cette découverte a déclenché un nouvel élan de recherches tant expérimentales que théoriques.

Issus d'une collaboration européenne et internationale, nos travaux explorent la fission d'une centaine de noyaux déficients en neutrons auprès d'un accélérateur de particules de l'installation internationale GSI, située près de Darmstadt, en Allemagne. En mesurant avec précision la distribution de charge des fragments de fission, nous apportons un éclairage inédit sur les effets microscopiques qui régissent la fission. Nous avons montré que cette nouvelle forme de division asymétrique est gouvernée par le fragment le plus léger, contrairement aux noyaux quasi stables où l'asymétrie est dictée par le fragment le plus lourd. L'asymétrie de la fission est présentée sur la FIGURE 1 pour l'ensemble

des noyaux étudiés: la variable d'asymétrie A_s est nulle lorsque la fission est symétrique et tend vers 1 pour une fission asymétrique; les deux îlots sont séparés par une large zone de fission symétrique.

Notre approche expérimentale (dispositif expérimental sur la FIGURE 2) apporte de nouvelles données qui révèlent un effet stabilisateur lié à des effets microscopiques dans le fragment léger avec un nombre de protons égal à 36 (krypton). Cet effet remarquable élargit notre compréhension de l'influence de la structure nucléaire sur la fission. Au-delà de la cartographie des différents modes de fission, il enrichit notre connaissance du phénomène et améliore la capacité des prévisions théoriques de la distribution des fragments de fission.

Cette découverte constitue la première étape dans l'étude de ce nouvel îlot. Des expériences complémentaires sont prévues au sein de la même installation, après d'importantes améliorations techniques. Nous espérons ainsi cartographier plus en détail cette zone de la carte des noyaux et faire progresser notre connaissance de la matière nucléaire.

RÉFÉRENCES

- 1 — P. Morfouace et al. « An asymmetric fission island driven by shell effects in light fragments », *Nature*, <https://www.nature.com/articles/s41586-025-08882-7>, 641, p. 339, (2025).



A. Forestier, G. Weck, P. Loubeyre CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

F. Datchi, S. Ninet Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie, Paris

G. Garbarino, M. Mezouar European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble

Dans les profondeurs des planètes géantes, une forme de glace surprenante

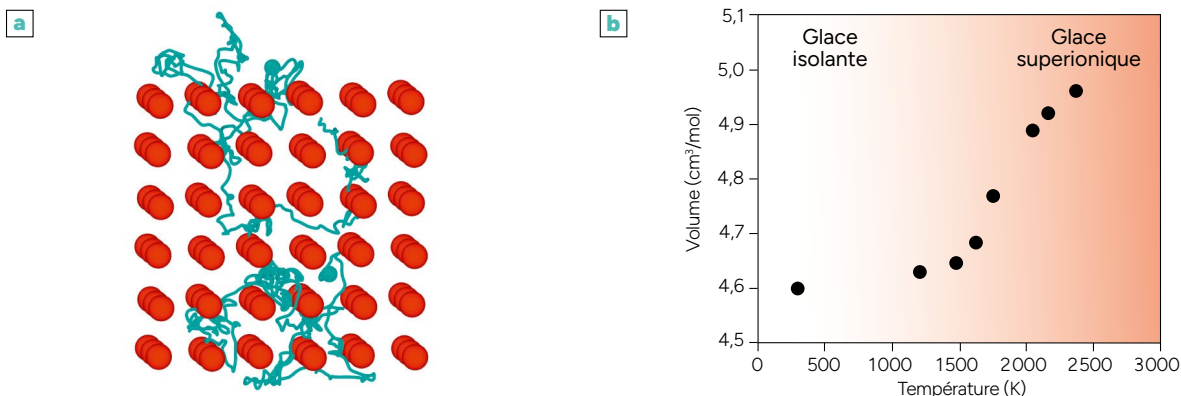
Sous des pressions et des températures extrêmement élevées, l'eau adopte des formes de glace aux propriétés inattendues. Une équipe du CEA - DAM et ses collaborateurs ont observé une signature du passage vers un état superionique, mi-liquide mi-solide, où l'hydrogène devient mobile tandis que l'oxygène reste organisé dans un réseau cristallin [1]. Cet état serait stable dans les intérieurs des planètes géantes de glace telles qu'Uranus et Neptune. Au CEA - DAM, ces travaux servent de banc d'essai pour pousser la finesse des mesures en conditions extrêmes.

L'eau est omniprésente sur Terre, elle l'est aussi ailleurs : dans les nuages interstellaires, sur des satellites glacés, dans les intérieurs de planètes géantes. Soumise à des pressions et à des températures variées, la molécule d'eau (H_2O) révèle une richesse de formes remarquable. À ce jour, plus d'une vingtaine de glaces cristallines différentes ont été identifiées, chacune correspondant à une organisation particulière des atomes d'oxygène et d'hydrogène. Cette diversité provient de la nature de la liaison hydrogène, une interaction chimique relativement faible et

directionnelle, qui assure la cohésion entre molécules d'eau.

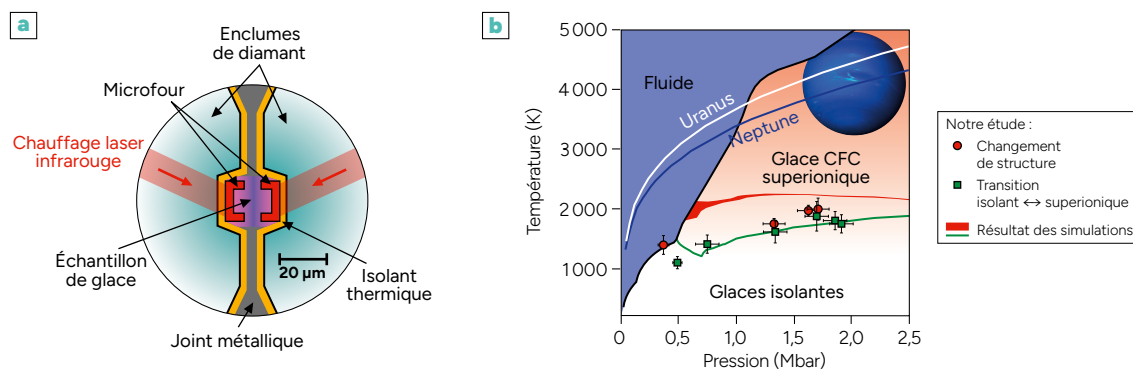
Parmi les objets les plus fascinants de notre Système solaire figurent Uranus et Neptune, deux planètes géantes dites de glace. Elles sont essentiellement constituées d'eau, d'ammoniac et de méthane (H_2O , NH_3 , CH_4). L'unique survol de ces deux planètes par la sonde *Voyager 2*, en 1986 et 1989, a révélé une surprise majeure, à la différence des autres planètes : des champs magnétiques très complexes, ni axisymétriques ni dipolaires, mais décentrés et fortement inclinés par rapport aux axes de rotation.

FIGURE 1



→ [a] Simulation numérique de glace superionique à une température de 2000 degrés, montrant les trajectoires de deux ions hydrogène (en bleu) dans le réseau cubique à faces centrées d'ions oxygène (en rouge); crédit : Grégory Geneste, CEA - DAM. [b] Évolution du volume molaire de la glace cubique à faces centrées en fonction de la température, mesurée dans notre étude expérimentale. L'augmentation de volume, autour de 1700 degrés, marque la transition entre la glace isolante et la glace superionique, ici observée à une pression de 1,91 million de bars.

FIGURE 2



→ [a] Schéma de principe de nos expériences. L'échantillon de glace est confiné dans un microfour composé de deux cuvettes micrométriques chauffées par lasers, entre les deux enclumes de diamant. [b] Diagramme de phase de l'eau aux très hautes pressions et températures. Les points rouges indiquent l'apparition de la structure cubique à faces centrées (CFC) lors d'une première chauffe. Les points verts marquent la température à laquelle elle devient superionique lors des chauffes suivantes. Les lignes de même couleur correspondent aux prévisions des simulations numériques associées à chacun de ces phénomènes [2]. Les courbes correspondant aux conditions des intérieurs d'Uranus et de Neptune sont indiquées. (Image de Neptune, crédit : Nasa)

Les pressions et températures qui règnent dans leurs profondeurs atteignent des valeurs extrêmement élevées, très éloignées de celles que nous connaissons à la surface de la Terre. D'où l'interrogation suivante : les propriétés d' H_2O , de NH_3 et de CH_4 dans ces conditions peuvent-elles expliquer ces champs magnétiques énigmatiques ?

À l'aide de simulations numériques, d'autres laboratoires ont proposé une explication : sous des pressions de l'ordre d'un million de fois la pression atmosphérique et des températures de l'ordre de 1000 degrés, l'eau et l'ammoniac formeraient des glaces superioniques. Il s'agit de glaces chaudes qui demeurent solides, car maintenues par la pression. Dans H_2O superionique, les molécules sont dissociées : les ions hydrogène sont mobiles et diffusent librement à travers le cristal formé par le réseau d'ions oxygène, comme représenté sur la FIGURE 1a. Cette propriété confère à la glace superionique une conductivité électrique élevée. Présente dans Uranus et Neptune, elle jouerait un rôle clé dans la géométrie de leurs champs magnétiques.

Les simulations issues de la littérature prévoient que cette glace adopte une structure cristalline cubique à faces centrées, bien connue en science des matériaux et identifiable expérimentalement par diffraction des rayons X. Nous avons employé cette technique sur le synchrotron européen ESRF, à Grenoble, pour suivre le comportement microscopique de la glace et ses changements de structure. Nous avons obtenu une signature claire du caractère superionique de la glace cubique à faces centrées. Lors du chauffage, nous observons une augmentation de volume autour d'une température caractéristique de la transition entre un solide isolant et un solide superionique (voir FIGURE 1b). Elle intervient lorsque les ions hydrogène deviennent mobiles et diffusent à travers les sites interstitiels du réseau cristallin d'oxygène.

Pour atteindre de telles pressions et températures, nous avons employé une cellule à enclumes de diamant. L'échantillon d'eau de quelques dizaines de

micromètres est piégé entre deux enclumes face à face, permettant d'atteindre des pressions colossales par un effet de pointe. Les hautes températures sont obtenues par un chauffage par laser : un élément clé de notre étude est le développement d'un microfour en diamant dopé au bore (voir FIGURE 2a). Il permet de chauffer l'échantillon de façon plus homogène, en maintenant des conditions de pression et de température stables et bien contrôlées. Cette géométrie innovante couplée à notre approche statique, où les conditions sont maintenues dans le temps, permet des mesures très fines.

Entre 2019 et 2021, trois équipes indépendantes, dont la nôtre, avaient rapporté les premières observations expérimentales de la glace cubique à faces centrées, à la suite de quoi une controverse était née sur la température à laquelle se forme la glace superionique. Notre étude a permis de préciser le domaine de stabilité de cette glace et de trancher cette controverse. Cette structure apparaît au-dessus de 1500-2000 degrés, lorsque la glace devient superionique (voir FIGURE 2b). Ce résultat montre que l'état superionique stabilise l'arrangement cubique à faces centrées.

À la lumière de nos expériences, cette glace serait bien présente dans les profondeurs d'Uranus et de Neptune, renforçant l'hypothèse de son rôle dans la génération de leurs champs magnétiques atypiques. D'autres formes de glace superionique, notamment hexagonales compactes, sont prévues à des pressions plus élevées. Leur observation expérimentale constitue un de nos prochains défis.

RÉFÉRENCES

1. A. Forestier, G. Weck, F. Datchi, S. Ninet, G. Garbarino, M. Mezouar, P. Loubeyre « X-ray signature of the superionic transition in warm dense fcc water ice », *Physical Review Letters*, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.076102>, **134**, 076102 (2025).
2. B. Cheng, M. Bethkenhagen, C. Pickard, S. Hamel « Phase behaviours of superionic water at planetary conditions », *Nature Physics*, <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01334-9>, **17**, p. 1228-1232 (2021).



A. Pires, V. Le Flanchec, A.-S. Chauchat CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

N. Delerue Laboratoire de physique des deux infinis Irène-Joliot-Curie (IJCLab), UMR 9012 CNRS – Université Paris-Saclay – Université Paris Cité, Orsay

Des loopings sur l'accélérateur d'électrons Elsa

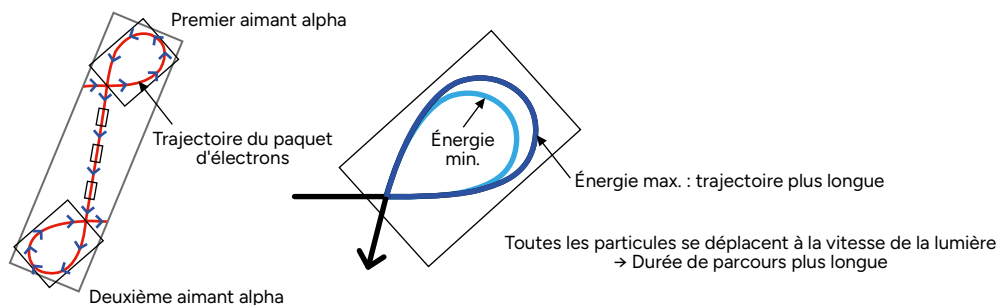
L'accélérateur d'électrons Elsa permet au CEA - DAM de produire du rayonnement X pour ses propres besoins. Or, lorsqu'on cherche à augmenter la production de rayonnement, des effets indésirables apparaissent. Les travaux présentés dans cet article nous ont permis de mieux comprendre et de contrôler les paquets d'électrons mis en jeu pour produire trois à quatre fois plus de rayonnement X [1,2].

Le rayonnement X intense est utile au CEA-DAM pour de nombreuses recherches : étudier le durcissement de composants électroniques [3] ou caractériser des détecteurs destinés à être utilisés sur une installation comme le Laser Mégajoule. Au centre DAM Île-de-France, ce rayonnement est produit par Elsa, un accélérateur linéaire d'électrons. Des paquets d'électrons sont accélérés et viennent heurter une cible fixe, par exemple un morceau de tantale, ou un faisceau laser, produisant alors le rayonnement. Les électrons atteignent une énergie allant jusqu'à 30 MeV, se déplaçant alors à 99,986 % de la vitesse de

la lumière. Or, pour satisfaire les besoins de nos utilisateurs, il faudrait encore augmenter la quantité de photons X produits.

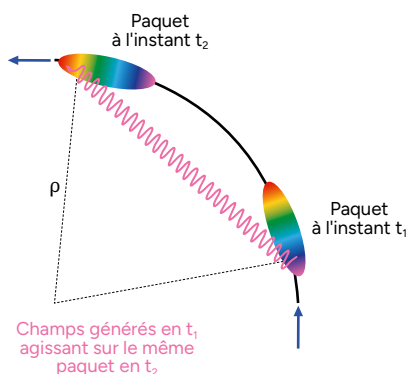
La solution semble *a priori* évidente : augmentons le nombre d'électrons, nous produirons ainsi davantage de rayonnement X. Mais ce n'est pas si simple : les électrons étant tous chargés négativement, ils se repoussent les uns les autres. Leur densité volumique diminue, réduisant fortement la production de rayons X dans le cas de l'interaction avec le faisceau laser. Ainsi, il ne suffit pas de maximiser le nombre d'électrons, il faut aussi maintenir une densité élevée. Nous avons

FIGURE 1



→ À gauche, schéma du compresseur double alpha sur Elsa, comprenant deux aimants alpha. La trajectoire du paquet d'électrons est en rouge. À droite, le principe de la compression est schématisé.

FIGURE 2



—> Schéma de l'interaction par le champ électromagnétique entre l'arrière et l'avant du paquet. Le champ se propage en ligne droite et « rattrape » le paquet d'électrons qui suit une trajectoire courbe.

donc tenté de mieux comprendre comment évolue la densité du paquet d'électrons en fonction de sa charge. Pour cela, une campagne de mesures a été conduite, ainsi qu'une étude comparative de trois codes de simulation reproduisant le transport des électrons et les effets des champs électromagnétiques générés par les électrons.

Ces simulations prennent en compte la géométrie particulière d'Elsa, peu commune dans le monde. Cet accélérateur comporte deux aimants dont le champ magnétique courbe très fortement les trajectoires des électrons. Ces derniers effectuent ainsi un *looping* en forme de lettre grecque α . Cette géométrie est particulièrement intéressante, car jouer sur leur trajectoire permet de comprimer dans le temps les paquets d'électrons. En effet, au sein d'un paquet d'électrons donné, la dispersion en énergie est de l'ordre de 1 %. Or, les trajectoires sont légèrement différentes en fonction de l'énergie des électrons. La longueur des trajectoires des électrons au sein des aimants alpha est de 98 cm pour les électrons les moins énergétiques, et 102 cm pour les plus énergétiques, un peu plus difficiles à dévier. Malgré cette dispersion, les vitesses des électrons sont pratiquement identiques, proches de la vitesse de la lumière. De ce fait, la durée de parcours des électrons les plus énergétiques au sein d'un aimant alpha est plus longue (FIGURE 1).

La différence de longueur des trajectoires de 4 cm est comparable à la longueur du paquet d'électrons. Pour comprimer un paquet, il suffit donc de placer les électrons plus énergétiques à l'avant. Ceux-ci se font rattraper par les électrons moins énergétiques initialement situés à l'arrière du paquet. La durée du paquet peut ainsi être réduite d'un facteur deux en sortie du compresseur.

Un autre effet à prendre en compte est celui du champ électromagnétique créé par le paquet d'électrons. De manière générale, celui-ci est une gêne : il

désordonne le paquet d'électrons, qui devient plus difficile à contrôler. Cet effet est négligeable tant que les électrons se déplacent en ligne droite. Mais il peut devenir problématique lorsque les trajectoires des électrons sont fortement courbées, comme au sein des aimants alpha.

En l'occurrence, une des spécificités d'Elsa est que les trajectoires des électrons ont un rayon de courbure très petit, 15 cm à son minimum. Les électrons suivent une courbe, mais le champ se déplace en ligne droite, presque à la même vitesse. Une partie du champ électromagnétique court-circuite donc la trajectoire des électrons et arrive plus rapidement à la sortie de la courbe, comme le montre la FIGURE 2. L'effet de désordre lié au champ électromagnétique est alors fortement amplifié.

Pour mieux appréhender l'effet de ces champs électromagnétiques, nous avons réalisé des simulations qui tiennent compte de cet effet, alors que la plupart des codes de simulation les négligent. Nous avons donc comparé deux codes classiques à un code plus complet incorporant l'effet de la propagation des champs sur les électrons. Nous avons comparé les résultats des trois codes avec des résultats expérimentaux. Tous sont en bon accord pour l'axe transverse Y, non affecté par la rotation (l'axe perpendiculaire à cette feuille). En revanche, nous avons pu montrer que, pour les deux codes classiques, il existe un désaccord important pour l'axe transverse X, affecté par la rotation. Nous avons montré que pour des paquets avec beaucoup d'électrons (charges supérieures à 2,5 nanocoulombs), les champs générés par les électrons ont un effet majeur sur les paquets d'électrons. Le code le plus complet, lui, reproduit bien cet effet.

Ces travaux nous offrent une meilleure compréhension du transport d'électrons au sein d'Elsa. Grâce à eux, nous avons optimisé la quantité d'électrons par paquet en tenant compte de l'effet des champs électromagnétiques, et ainsi multiplié par trois ou plus la production de rayonnement X.

RÉFÉRENCES

- 1 — A. Pires, V. Le Flanchec, A.-S. Chauchat, N. Delerue « Comparison of the simulation of electron beam transport in the double alpha magnet compressor of a 17-MeV electron accelerator using CST PS, TraceWin and RF-Track », *Nucl. Instrum. Method. A*, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170541>, 1077, 170541 (2025).
- 2 — A. Pires, *Optimisation de la source X impulsionnelle par diffusion Compton inverse d'un accélérateur linéaire d'électrons*, thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay soutenue le 12 décembre 2024 <http://www.theses.fr/2024UPASP156/document>.
- 3 — Collectif du CEA - DAM, *Électronique*, revue *chocs*, 53, 88 pages (2023).



D. Rochais, T. Piquero, Y. Scaringella-Guerriat CEA - DAM, centre du Ripault

A. Benjira, G. Antou, D. André, A. Maître Institut de recherche sur les céramiques (Ircer), UMR 7315 CNRS – Université de Limoges, Laboratoire de recherches conventionné Electra, Limoges

Quand isolation rime avec densification

Un travail collaboratif entre le CEA - DAM et l'Institut de recherche sur les céramiques à Limoges a permis d'acquérir des connaissances sur les mécanismes de consolidation et de densification intervenant lors de la fabrication de céramiques à base de silice [1]. Ces connaissances sont primordiales pour optimiser leur procédé de fabrication et pour augmenter la pertinence des modélisations numériques. À terme, l'objectif pour le CEA - DAM est de maîtriser l'impression 3D de structures complexes à base de céramiques pour l'isolation thermique à haute température des corps de rentrée des têtes nucléaires.

Les céramiques sont essentielles dans de nombreuses industries en raison de leur capacité à résister à des températures élevées et à des environnements corrosifs. Elles sont mises en œuvre dans des fours, des revêtements protecteurs, des isolants thermiques, etc. À partir d'une poudre de matière, elles sont obtenues par un procédé industriel appelé frittage : sous l'action combinée de la chaleur et de la pression, le matériau est densifié et consolidé. L'optimisation des performances, c'est-à-dire l'atteinte des meilleures propriétés mécaniques et thermiques, passe par la maîtrise des mécanismes – souvent méconnus – de densification des poudres à l'œuvre lors du procédé de fabrication [2]. Dans le cas de la silice, notre étude a permis d'identifier précisément et d'optimiser ces mécanismes aux premières étapes de frittage.

Pour parvenir à ce résultat, nous avons utilisé une poudre de silice d'une pureté chimique supérieure à 99,9%. Celle-ci est principalement composée de particules sphériques de 1 à 2 μm de diamètre. Dans un premier temps, des échantillons cylindriques de cette poudre ont été compactés par pressage à l'Ircer à Limoges. Puis leur comportement au frittage a été étudié avec des analyses poussées de dilatométrie, permettant de suivre leur contraction ; la densification de cette poudre commence à partir de 1200 °C.

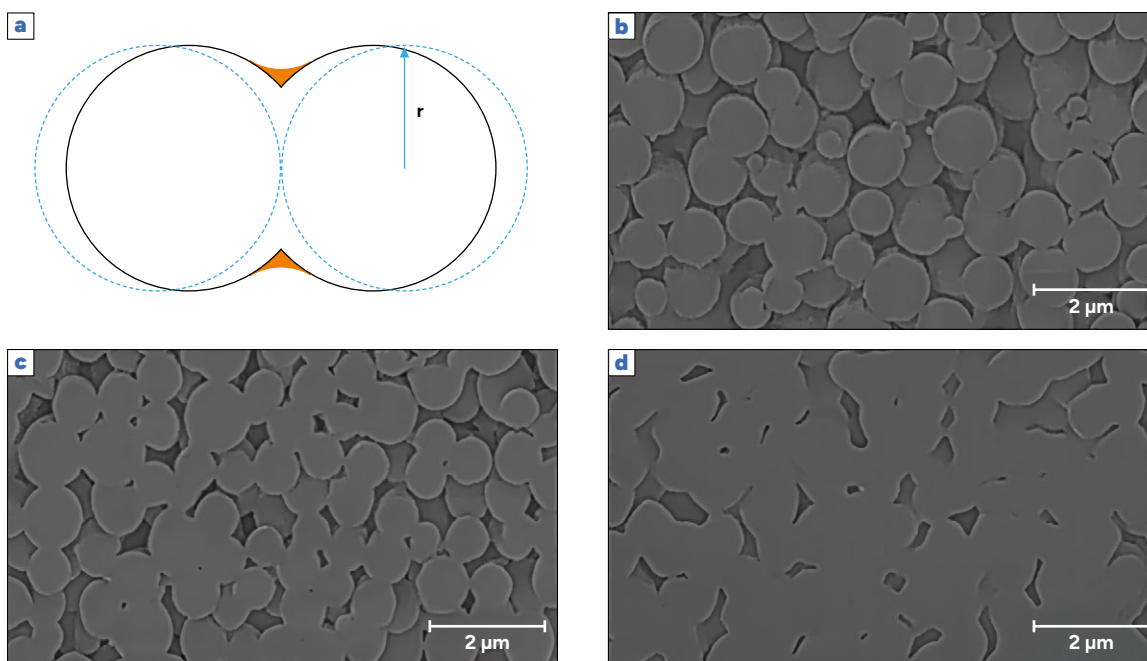
Grâce à ces analyses, nous avons établi que le processus de densification est contrôlé par un mécanisme d'écoulement visqueux et déterminé des paramètres clés tels que l'énergie d'activation et la viscosité. L'énergie d'activation est l'énergie nécessaire

à apporter pour que le frittage se produise. Elle a été évaluée à une valeur 30 % plus faible que celle de l'alumine, autre matériau céramique très utilisé ; cela donne une idée de la facilité avec laquelle la silice peut se densifier à haute température. La viscosité, qui mesure la résistance d'un liquide à l'écoulement, a aussi été évaluée à 1250 °C : le matériau est encore relativement fluide à cette température, ce qui permet aux particules de se déplacer et de se regrouper, facilitant ainsi sa contraction.

Nous avons aussi étudié à l'Ircer l'évolution de la morphologie de la poudre de silice, à différents stades du cycle de température imposé (FIGURE 1). Cette poudre commence à se densifier par la diffusion de matière entre les particules portées à 1250 °C, mais pas de manière significative. Elle passe en effet par une phase intermédiaire de consolidation où les particules commencent à se lier en formant des cous interparticulaires (FIGURES 1a et 1c). Ces cous correspondent à des zones où la silice commence à s'écouler, facilitant ainsi la diffusion de matière. Puis, en maintenant ce niveau de température, la contraction progresse, ces cous deviennent plus grands et les particules commencent à coalescer, formant des agglomérats (FIGURE 1d).

Toutefois, nous ne recherchons pas nécessairement la densification maximale, car c'est la présence d'une porosité résiduelle après frittage qui permet d'assurer la capacité d'isolation thermique finale de la pièce. Plus elle sera dense, moins elle sera isolante. C'est pourquoi la compréhension fine du frittage est importante afin de maîtriser au mieux ce compromis.

FIGURE 1



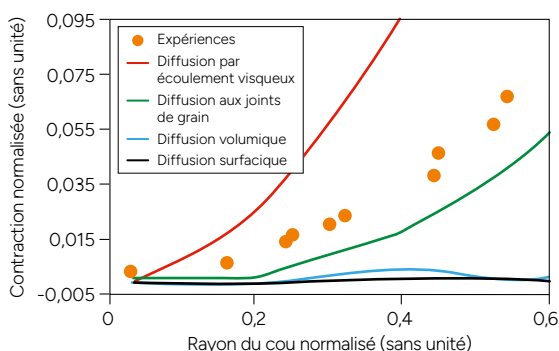
→ Évolution morphologique de la poudre de silice compactée au cours des étapes de frittage. [a] Schéma illustrant la diffusion de masse entre deux particules de rayon r , initialement en contact (---), entraînant la formation d'un « cou » (en orange) liant les particules. [b,c,d] Observations par microscopie électronique à balayage de la poudre : [b] avant frittage, [c] après avoir été portée à 1 250 °C et [d] après maintien d'un palier de 1 250 °C pendant 34 min.

Ces résultats expérimentaux ont permis d'établir la courbe de croissance de la contraction volumique en fonction de celle du cou interparticulaire. Nous avons comparé cette trajectoire à celles issues de modèles numériques de la littérature (FIGURE 2). Il en ressort que les modèles existants de densification par diffusion de surface ou de volume sous-estiment la trajectoire de croissance des cous. Ces modèles ne prennent pas en compte tous les phénomènes

physiques identifiés dans notre étude, en particulier les interactions entre plusieurs particules. Les modèles de diffusion visqueuse et de diffusion aux zones de contact entre les grains, appelés joints de grain, encadrent les résultats expérimentaux.

Nous utiliserons les informations précieuses obtenues sur les mécanismes de frittage pour enrichir la modélisation du frittage et reproduire plus fidèlement les phénomènes observés avec la silice. Notre travail de modélisation pourra ensuite être utilisé afin d'optimiser le procédé d'impression 3D retenu [3] et d'améliorer la prévision des propriétés thermiques et mécaniques des structures poreuses fabriquées à base de silice.

FIGURE 2



→ Comparaison de la courbe expérimentale d'évolution de la contraction volumique, mesurée par le CEA - DAM et l'Ircer, en fonction de celle du cou interparticulaire, avec celles obtenues par différents modèles physiques issus de la littérature : les modèles encadrent les mesures. Ce travail nous aidera à développer notre propre modèle de frittage, qui nous permettra ensuite d'optimiser le procédé d'impression 3D des structures poreuses à base de céramiques dont nous voulons mieux contrôler la capacité d'isolation thermique à haute température.

RÉFÉRENCES

- 1 — A. Benjira, G. Antou, D. André, D. Rochais, T. Piquero, Y. Scaringella-Guerritat, A. Maitre « In-depth characterization of the early sintering stages of an amorphous silica powder », <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.117031>, 45, 117031(2025).
- 2 — Collectif du CEA - DAM, « III. Vers une ingénierie numérique des matériaux », dans *Matériaux et procédés : un savoir-faire spécifique*, revue chocs, 51, p. 69-93 (2020).
- 3 — C. Laute *Conception et élaboration par fabrication additive de matériaux céramiques à porosité contrôlée – Modélisation et propriétés physiques*, thèse de doctorat de l'université de Tours soutenue le 16 février 2024.

D. Toussaint, J.-P. Braeunig, C. Baranger CEA - DAM, centre du Cesta
H. Noubel, V. Lago Institut de combustion aérothermique, réactivité et environnement (Icare), CNRS, Orléans

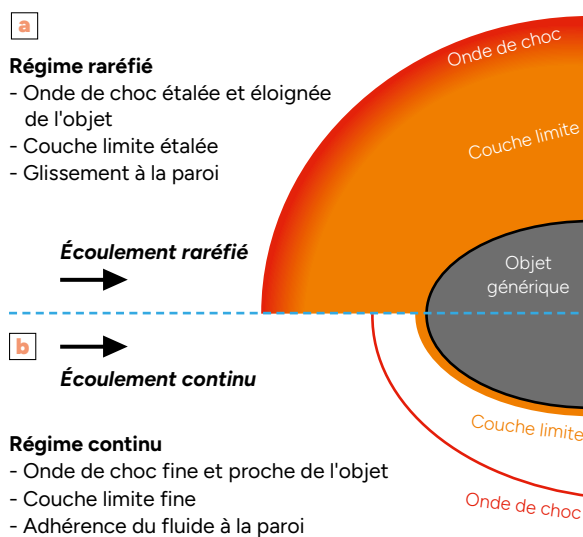
Rentrée atmosphérique : quel culot ?

Que se passe-t-il quand un véhicule spatial pénètre dans une couche d'air peu dense ? Pour le savoir, une équipe du CEA - DAM, spécialiste en méthodes numériques, s'est associée à des chercheurs du CNRS spécialisés en méthodes expérimentales. Objectif : analyser l'influence de la géométrie de la partie arrière, dite culot d'un véhicule spatial, sur ses performances aérodynamiques à haute altitude. Cette étude [1] est primordiale pour la validation des modèles physiques et outils de simulation du CEA - DAM. Elle est d'autant plus importante que les données sur les écoulements dans des milieux très peu denses ne sont pas nombreuses.

Lors de sa rentrée dans l'atmosphère terrestre, à environ 120 km d'altitude, un véhicule spatial, comme une tête nucléaire, traverse différentes couches d'air, de pression et densité très variables. Par exemple, la pression de l'air est plus de cent mille fois plus faible à 80 km d'altitude qu'au sol. Les différences de pression rencontrées lors d'une rentrée atmosphérique à très grande vitesse (plusieurs fois la vitesse du son) impactent fortement la physique de l'écoulement de l'air autour du véhicule, comme l'illustre la FIGURE 1.

Nous nous intéressons ici aux écoulements dits raréfiés, qui ont lieu à haute altitude, donc à faible pression. Leur étude est moins répandue que celle des écoulements à basse altitude (dits continus), car les efforts subis par le véhicule spatial sont généralement plus faibles à haute altitude. Pourtant, pour s'assurer de la réussite de la mission liée à la précision sur cible et optimiser la géométrie du véhicule, il est primordial d'estimer ces efforts avant le vol. Pour ce faire, il est nécessaire de développer des modélisations physiques, des outils de simulation numérique et des moyens expérimentaux spécifiques aux écoulements raréfiés. Le CEA-DAM développe de tels modèles et outils de simulation ; le laboratoire Icare du CNRS dispose quant à lui d'une soufflerie, appelée MARHy, unique en France, permettant de reproduire en laboratoire des écoulements apparaissant au-dessus de 70 km d'altitude. C'est donc tout naturellement que le CEA et le CNRS ont associé leurs forces dans le cadre de cette étude, adossée au projet de recherche nommé CHYP, pour Culot HYPersonique, financé par l'Agence nationale de la recherche.

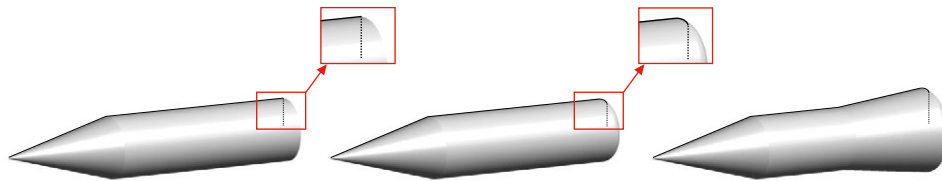
FIGURE 1



→ Schéma illustrant les principales différences entre [a] des écoulements hypersoniques raréfiés (haute altitude) et [b] continus (basse altitude) autour d'un même véhicule de rentrée atmosphérique. Plus la pression est faible, plus la couche limite (c'est-à-dire la zone de l'écoulement directement perturbée par la présence du véhicule) s'épaissit et plus l'onde de choc apparaissant en amont de l'objet s'élargit et s'éloigne du véhicule.

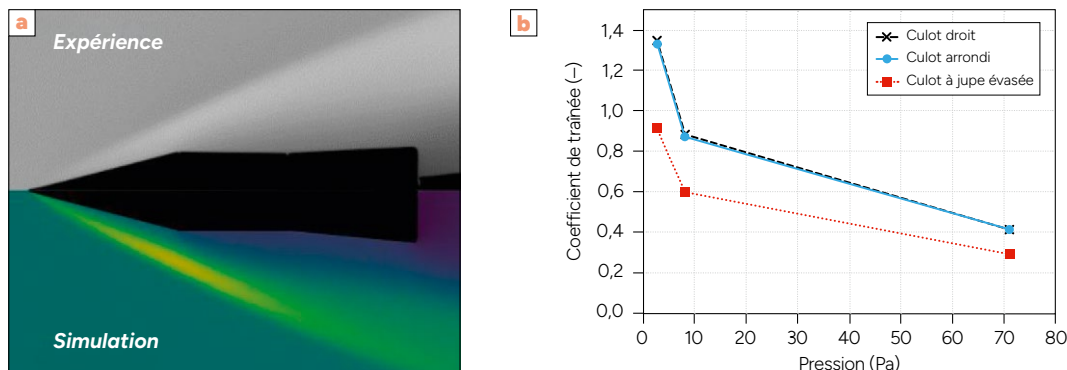
L'objectif de cette étude commune est double : identifier quelle géométrie de culot a les meilleures performances aérodynamiques en fonction de la pression de l'air, et plus généralement valider nos codes de calcul en régime raréfié [1].

FIGURE 2



→ Représentation des trois géométries de véhicules considérées : à culot à bord droit (à gauche), à culot à bord arrondi (au milieu) et à jupe évasée (à droite).

FIGURE 3



→ [a] Comparaison de l'écoulement observé en soufflerie (en haut) avec l'écoulement simulé numériquement (en bas), pour le véhicule à jupe évasée. Les zones les plus claires sont celles de plus grande pression. La simulation numérique parvient à reproduire l'écoulement observé. [b] Évolution du coefficient de traînée en fonction de la pression et de la géométrie du culot. Plus la pression est faible, c'est-à-dire plus l'écoulement est raréfié, plus le coefficient de traînée du véhicule augmente. Le culot évasé permet d'obtenir le coefficient de traînée le plus faible.

La géométrie du culot a un effet direct sur la position et la forme de l'onde de choc qui apparaît lors de la rentrée dans l'atmosphère. Elle modifie également l'écoulement en aval du culot, ce qui influe sur la force de traînée subie par l'objet. Cette force résulte des efforts appliqués par les particules d'air sur le véhicule spatial et tend à s'opposer à son mouvement. On cherche donc à la minimiser. Nous nous sommes intéressés à un véhicule spatial de type cône-cylindre avec trois géométries de culot distinctes : à bord droit, à bord arrondi et à jupe évasée (FIGURE 2). La campagne d'essais dans la soufflerie MARHy a été réalisée avec ces trois géométries. La vitesse de l'écoulement était quatre fois plus grande que celle du son, et nous avons fait varier la pression de l'air de 2 à 71 pascals (0,02 à 0,71 mbar) pour générer des écoulements plus ou moins raréfiés. Nous avons mesuré la force de traînée du véhicule ainsi que la pression de l'écoulement à proximité de celui-ci. En parallèle, nous avons effectué des simulations numériques sur le supercalculateur Exa 1 du CEA-DAM avec un code de simulation dédié aux écoulements raréfiés, développé au CEA-DAM [2].

Ces travaux ont mis en avant plusieurs résultats illustrés sur la FIGURE 3. Tout d'abord, la comparaison des mesures aux résultats numériques permet de valider la bonne restitution de l'expérience avec

le code de simulation du CEA-DAM. Une telle validation est précieuse, car les données expérimentales en régime raréfié sont particulièrement rares. Ensuite, cette étude a permis d'illustrer que, pour une configuration de culot donnée, le coefficient de traînée augmente drastiquement lorsque la pression de l'air diminue (il est ici multiplié par trois). Cela est principalement lié au fait que, lorsque la pression diminue, les frottements du fluide (parallèles à l'objet) deviennent prépondérants devant les effets de pression (perpendiculaires à l'objet). D'autre part, la modification de géométrie entre le culot droit et le culot arrondi a un effet négligeable sur les efforts subis par le véhicule. Enfin, la configuration à jupe évasée est celle qui minimise systématiquement le coefficient de traînée.

RÉFÉRENCES

- 1— D. Toussaint, H. Noubel, J.-P. Braeunig, C. Baranger, V. Lago « Influence of rarefaction degree and aft-body geometry on supersonic flows », *AIAA Journal*, <https://doi.org/10.2514/1.J063798>, 63 (1) (2025).
- 2— C. Baranger, J. Claudel, N. Hérouard, L. Mieussens « Locally refined discrete velocity grids for stationary rarefied flow simulations », *Journal of Computational Physics*, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2013.10.014>, 257 (15) (2014).



B. Aubert, D. Hébert, J.-L. Rullier, E. Lescoute CEA - DAM, centre du Cesta

L. Videau CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

L. Berthe Laboratoire Procédés et ingénierie en mécanique et matériaux (Pimm), UMR 8006 CNRS – Ensam ParisTech, Paris

Des lasers pour améliorer la résistance des satellites

Comment éprouver la résistance des satellites face à des impacts se produisant à plusieurs kilomètres par seconde sans avoir recours à des projectiles mis en vitesse par des canons de laboratoire complexes et coûteux ? Une équipe du CEA - DAM, en collaboration avec le laboratoire parisien Pimm, a montré qu'un tir laser peut reproduire fidèlement en laboratoire les effets d'un impact hypervélocé [1]. Cette approche originale ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude et la qualification des matériaux exposés aux débris spatiaux, comme de ceux développés pour les programmes du CEA - DAM.

Avec le développement des activités spatiales, la quantité de débris en orbite autour de la Terre ne cesse d'augmenter. Bien qu'ils soient souvent plus petits qu'un grain de sable, ces fragments représentent une menace sérieuse : lancés à plusieurs kilomètres par seconde, ils peuvent endommager gravement les satellites qu'ils percutent. Ces collisions violentes, appelées impacts hypervélocés, sont difficiles à reproduire en laboratoire. Certes, des canons de laboratoire classiques, comme certains lanceurs à gaz ou à poudre du CEA-DAM, peuvent reproduire une telle collision ; cependant, ils sont complexes à mettre en œuvre, les campagnes de tir sont longues et coûteuses. C'est pourquoi, dans le passé, des chercheurs américains ont proposé une approche originale pour contourner cette difficulté : remplacer le lancer d'un projectile par un tir laser. Les travaux que nous avons menés conjointement avec le laboratoire Pimm ont abouti à une méthode robuste qui assure l'équivalence entre ces deux configurations expérimentales.

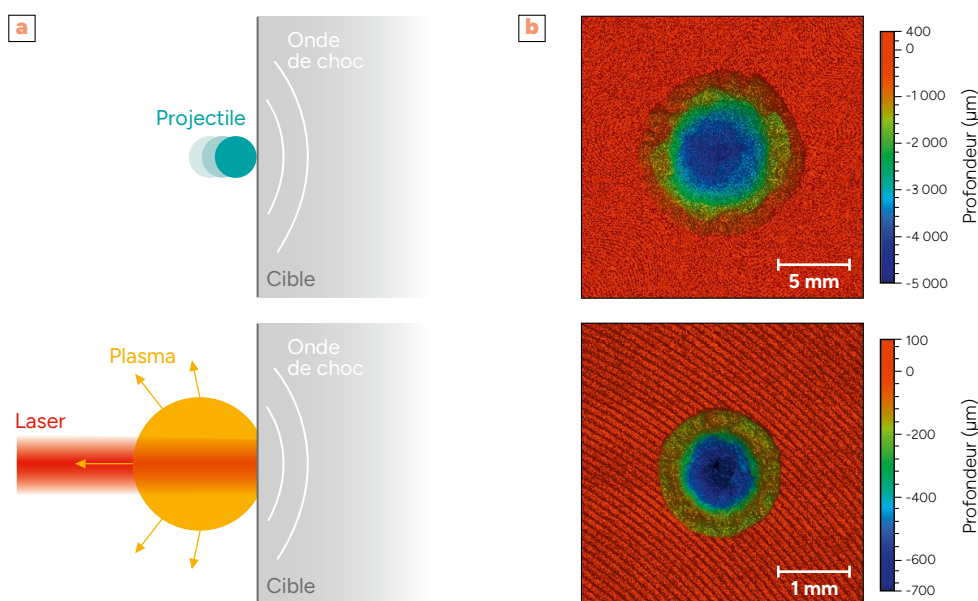
Lorsqu'un projectile frappe une cible, il imprime une pression extrêmement élevée à la surface du matériau. Une onde de choc se propage alors dans la matière, pouvant conduire à son endommagement et à la formation d'un cratère. De manière analogue, lorsqu'un laser de haute énergie est focalisé sur une cible, il est absorbé dans les tout premiers micromètres de matière qui se vaporisent instantanément, créant

un plasma, état de la matière constitué d'un mélange d'ions et d'électrons. Ce plasma se détend violemment, exerce une pression sur la surface de la cible et crée une onde de choc dans le matériau, conduisant à la formation d'un cratère (FIGURE 1).

La taille et la forme d'un cratère ne dépendent pas du moyen expérimental à l'origine de la pression, mais du champ de pression exercé à la surface du matériau. Ainsi, l'analogie entre impact hypervélocé et tir laser est rendue possible : en ajustant les paramètres du laser – énergie délivrée, durée de l'impulsion et diamètre du faisceau –, nous façonnons le champ de pression appliqué de manière à le rendre équivalent à celui généré par l'impact d'un projectile.

Pour illustrer cette méthode, un tir laser a été réalisé avec le générateur de choc laser transportable (GCLT) du centre DAM Île-de-France. Une énergie de 40 J a été délivrée sur une cible en graphite, avec une durée d'impulsion de 100 ns et un diamètre de faisceau de 250 μm . Nous avons déterminé le champ de pression induit par ce tir laser par simulation numérique à l'aide des codes Esther et Hésione, développés au CEA-DAM. Nous avons aussi utilisé le code Hésione pour simuler des impacts de projectiles en aluminium, de tailles et de vitesses variées, afin de constituer une base de données numériques de champs de pression. Par interpolation au sein de cette base, le projectile équivalent au tir laser a été identifié : il s'agit de celui qui génère un

FIGURE 1



→ [a] Schéma illustrant les similitudes entre un impact de projectile (en haut) et un tir laser (en bas) sur une cible en graphite.
 [b] Un exemple de cratère obtenu est présenté pour chaque configuration expérimentale. En haut : impact d'une bille en polymère de 2 mm de diamètre à 4,8 km/s. En bas : tir laser de 40 J, de durée d'impulsion 100 ns et de diamètre de faisceau 250 μm. L'échelle de couleur représente la profondeur du cratère à la surface de l'échantillon. Le diamètre et la profondeur de chaque cratère ne dépendent que du champ de pression exercé.

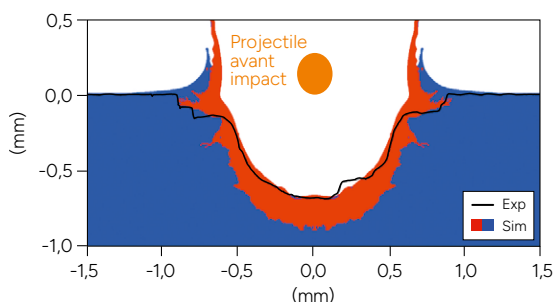
champ de pression similaire. Dans le cas du tir laser réalisé avec notre générateur, le projectile équivalent est une bille d'aluminium d'environ 250 μm de diamètre, frappant la cible à une vitesse proche de 4,6 km/s.

Ce résultat a d'abord été validé numériquement en simulant l'impact de la bille et en comparant les dimensions du cratère obtenu à celles du cratère produit par le tir laser. L'accord est excellent, comme

le montre la **FIGURE 2**. Une validation expérimentale a également été rendue possible grâce à une collaboration avec un laboratoire de la Jaxa, l'agence spatiale japonaise. L'équipe de la Jaxa est parvenue à lancer des billes en aluminium de seulement 380 μm de diamètre à des vitesses d'environ 2,9 et 5,3 km/s sur des cibles en graphite. Le tir laser réalisé avec notre générateur s'accorde parfaitement avec ces deux tirs de lanceur. Ce résultat valide définitivement l'analogie proposée.

Ces travaux permettront de tester plus facilement la résistance aux impacts des matériaux utilisés dans le domaine spatial en tirant parti des nombreux avantages des installations laser : précision sur le point d'impact, cadence de tir élevée et, surtout, accès à des régimes de vitesse d'impact et de taille de projectile inaccessibles aux lanceurs conventionnels. La même méthode montre que l'effet d'impact à plus de 60 km/s pourrait être reproduit à l'aide du Laser Mégajoule !

FIGURE 2



→ Comparaison entre la simulation (en rouge et bleu) de l'impact d'une bille en aluminium d'environ 250 μm de diamètre à 4,6 km/s et la mesure (trait noir) du cratère généré par un tir laser de 40 J, de durée d'impulsion 100 ns et de diamètre de faisceau 250 μm. La zone rouge de la simulation correspond à la partie endommagée du matériau : elle reproduit parfaitement la mesure.

RÉFÉRENCES

1. B. Aubert et al. « Laser simulation of hypervelocity impact into porous graphite », *International Journal of Impact Engineering*, 206, 105474 (2025).

La chute accidentelle d'un explosif peut-elle conduire à sa détonation ?

Les recherches menées au CEA - DAM sur les explosifs incluent l'étude de situations accidentelles, afin de minimiser tout risque de détonation intempestive. On sait depuis longtemps qu'un impact à faible vitesse peut avoir des conséquences bien plus importantes qu'un impact à vitesse supérieure. Une équipe conduite par le CEA - DAM a récemment trouvé une explication à ce paradoxe apparent [1].

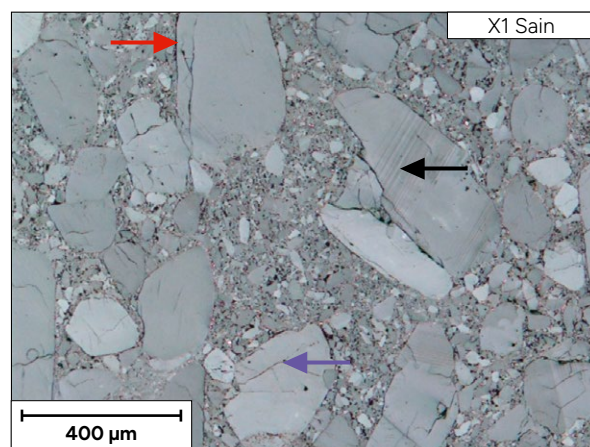
On sait qu'un impact violent conduit à la détonation d'un explosif, mais qu'en est-il d'un impact à vitesse faible ou modérée ? Nous avons récemment mis en lumière le phénomène qui semble expliquer pourquoi un faible impact peut déclencher la détonation, contrairement à un impact modéré. Ce paradoxe était connu expérimentalement depuis une soixantaine d'années, mais personne jusqu'ici ne pouvait l'expliquer. Ces impacts peuvent résulter d'une chute au sol ou de la chute d'un objet sur l'explosif.

Un explosif est stocké dans une enceinte de protection. Si celle-ci reçoit un impact, la contrainte mécanique transmise à l'explosif peut conduire à un cisaillement du matériau. Or, un matériau explosif n'est pas un milieu homogène : il est constitué de grains. Par conséquent, un échauffement local par frottement aux joints de grains se produit et l'explosif commence à brûler. La combustion peut tout à fait rester lente ; cependant, si elle s'accélère, alors une réaction violente survient, menant à la détonation.

Classiquement, de nombreux essais réalisés sur champ de tir sont nécessaires pour établir les corrélations entre conditions d'impact et violence de la réaction, sans toutefois réussir à les prévoir. En faisant l'hypothèse que la vivacité de la combustion de l'explosif dépend fortement de l'état d'endommagement

de l'explosif, nous avons étudié l'évolution simultanée de la microstructure du matériau et de sa combustion en fonction de la pression générée par l'impact. Par analogie, le feu d'une bûche est bien plus vif si elle est

FIGURE 1



→ Observation microscopique sous lumière polarisée du matériau avant sollicitation mécanique. Des défauts issus du processus de fabrication sont présents dans le matériau : des bandes de plasticité (flèche noire), des fissures intragranulaires (flèche violette) et des décohésions entre les grains et la matrice (flèche rouge).

réduite en de nombreuses brindilles, car la surface de combustion plus importante augmente la vivacité de la combustion.

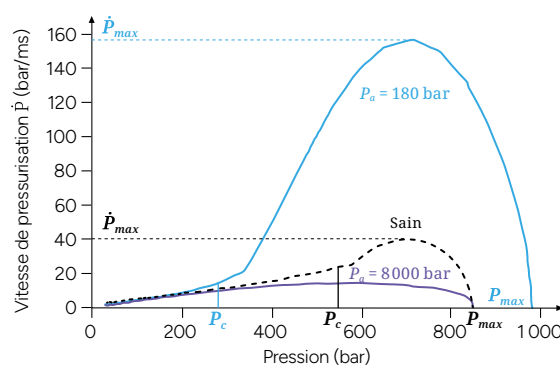
La composition explosive étudiée est constituée d'une grande quantité de grains d'explosif, d'un liant polymère et d'une porosité résiduelle. La **FIGURE 1** montre que la microstructure initiale du matériau est comparable à celle d'un béton: de gros grains de taille supérieure à 100 μm à l'intérieur d'une matrice constituée de grains plus petits, du liant (difficilement observable sur les images) et de la porosité. Ce matériau n'est initialement pas vierge de tout défaut. En effet, des fissures sont visibles dans les gros grains (traits sombres indiqués par la flèche violette), tout comme des décohésions entre les grains et la matrice (flèche rouge). Des réseaux de bandes de plasticité parallèles (flèche noire) apparaissent aussi, provenant de la déformation des grains lors de la fabrication de l'explosif.

Pour mener à bien cette étude, notre idée a consisté dans un premier temps à placer un échantillon d'explosif dans une presse pour reproduire la pression exercée sur le matériau lors d'un impact faible ou modéré. Comme la pression appliquée p_a pour reproduire un impact modéré peut atteindre plusieurs milliers de bars, nous avons utilisé une presse unique en Europe, située au centre de Gramat ; dans cet essai, la pression atteinte est égale à celle générée lors de l'impact ; cependant, la presse permet de l'appliquer très lentement et donc de ne pas faire exploser l'échantillon.

Dans un deuxième temps, nous avons découpé en deux l'échantillon sous test: une moitié sert à l'étude de la microstructure et l'autre est brûlée. L'observation au microscope optique montre que le nombre de décohésions est plus important dans les échantillons ayant subi une pression p_a inférieure à 500 bars que dans le matériau initial; en effet, à faible pression, la matrice confinée se déforme quand les gros grains sont peu sollicités. Au contraire, le nombre de décohésions est plus faible pour les échantillons ayant subi une pression p_a plus élevée (jusqu'à 8000 bars); en effet, dans ce cas, les gros grains et la matrice se déforment ensemble.

Dans une enceinte fermée, une gélule de poudre noire permet de chauffer la seconde moitié de l'échantillon d'explosif sous test et de démarrer ainsi la combustion. Les gaz issus de la combustion ne pouvant s'échapper, la pression monte rapidement dans l'enceinte. Un capteur mesure cette augmentation de pression et permet de tracer l'évolution de la vitesse de pressurisation $\dot{P}$ en fonction de la pression P . La pression critique P_c caractérise le passage d'une combustion lente à une réaction violente et correspond à la pression où nous observons un changement de pente sur la **FIGURE 2**. Notre étude montre que la pression critique P_c de combustion est intimement reliée à la pression appliquée P_a . En effet, pour

FIGURE 2



→ Vitesse de pressurisation en fonction de la pression pour le matériau sain et deux échantillons ayant été sollicités à deux pressions de confinement différentes (180 bars et 8000 bars). La pression de confinement de 180 bars fait diminuer la pression critique par rapport au matériau sain. Pour l'échantillon de 8000 bars, la combustion n'est pas accélérée (absence de pression critique).

les pressions appliquées inférieures à 500 bars, la pression critique est plus faible que celle du matériau initial. Inversement, elle augmente si la pression appliquée croît au-delà de 500 bars. Pour les plus fortes pressions appliquées à l'échantillon, aucune pression critique n'est observée: la combustion reste lente et aucune détonation ne peut avoir lieu (échantillon soumis à 8000 bars sur la **FIGURE 2**).

L'analyse simultanée de la microstructure et des combustions a permis de comprendre comment un impact accidentel change le nombre des défauts au sein de la microstructure et comment la nature des défauts influence la pression critique de combustion de l'explosif. Nous avons ainsi compris que les décohésions entre les gros grains et la matrice, apparues lors de l'impact à faible vitesse, favorisent l'abaissement de la pression critique, car elles augmentent la surface accessible aux gaz chauds. L'accroissement de cette surface chauffée accélère exponentiellement la quantité de gaz produite et donc la pression dans l'enceinte. On passe ainsi rapidement d'une combustion lente à une réaction violente.

Les travaux se poursuivent en collaboration avec l'Insa Centre-Val de Loire pour modéliser l'apparition de ces décohésions et pour prévoir la violence de la réaction lors d'un faible impact sur un explosif.

RÉFÉRENCES

- 1 — É. Hamon, D. Picart, M. Caliez, A. Frachon, M. Gratton « Mechanical loading dependence on burning surface areas », *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, <https://doi.org/10.1002/prep.12047>, 50, e12047 (2025).
- 2 — É. Hamon *Endommagement, fragmentation et combustion d'un matériau explosif comprimé*, thèse de doctorat en génie mécanique de l'Insa Centre-Val de Loire soutenue le 12 mars 2025.



Explosion du port de Beyrouth : des éclaircissements grâce au calcul haute performance

Dans le cadre des missions qui lui sont confiées, le CEA - DAM a développé des outils de calcul pour simuler les effets d'une puissante explosion en milieu urbain. Ces outils ont été mis en œuvre pour comprendre l'explosion du port de Beyrouth en 2020 et pour estimer la nature et l'énergie d'une catastrophe mal comprise, objet de rumeurs et d'interprétations douteuses [1].

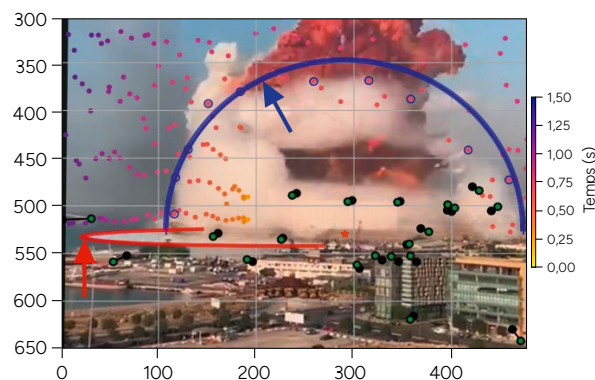
Le 4 août 2020, une explosion massive se produit dans le port de Beyrouth, traumatisant le peuple libanais, causant des dizaines de morts, des milliers de blessés et des dégâts considérables dans toute la ville. À l'origine de la catastrophe : environ 2 750 tonnes de nitrate d'ammonium, un produit chimique couramment utilisé comme engrais, stockées depuis 2014 dans un entrepôt du port. Ce 4 août, un incendie se déclare dans l'entrepôt : en chauffant, le nitrate d'ammonium se mélange avec d'autres matériaux inflammables stockés à proximité ; au bout d'une vingtaine de minutes, le nitrate d'ammonium explose dans une puissante détonation. Une énergie colossale est alors libérée : une immense boule de feu et une onde de choc destructrice se propagent dans toute la ville.

Cet événement a fait l'objet d'études contradictoires et de rumeurs plus ou moins fondées. L'estimation de l'énergie de l'explosion varie fortement : de 200 à 1 400 tonnes d'équivalent TNT selon les données et les méthodes utilisées par les chercheurs. Ces incohérences se traduisent dans le grand public par des théories contradictoires sur la nature réelle de l'explosion. On la suspecte d'être d'origine nucléaire, déclenchée par un missile, une bombe aérienne ou encore par une charge explosive cachée.

S'il est impossible de déterminer avec certitude l'enchaînement exact des événements, la communauté scientifique dispose néanmoins d'observations

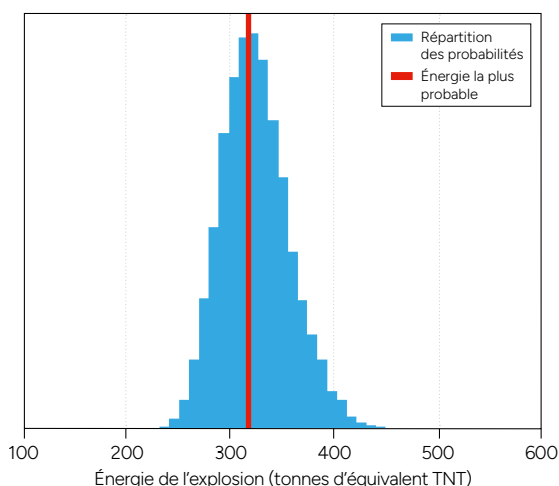
abondantes. En effet, de nombreuses personnes étaient en train de filmer la scène avec leur smartphone au moment de l'explosion. Ces vidéos, combinées avec d'autres observations – enregistrements sismiques, dimensions du cratère, images satellites, endommagement des bâtiments – fournissent une grande quantité d'information.

FIGURE 1



→ Exemple de mesures réalisées à partir des vidéos de l'explosion. La position de l'onde de choc à la surface de l'eau est colorée en rouge, celle de la frontière du nuage de condensation en bleu. Tous les points de mesure du nuage de condensation sont colorés par le temps d'arrivée de l'onde de choc.

FIGURE 2



—> Estimation probabiliste de l'énergie de l'explosion de Beyrouth en comparant les simulations avec les observations. L'énergie la plus probable correspond à environ 320 tonnes d'équivalent TNT.

Nous avons récemment proposé une meilleure estimation de l'énergie [2], déterminé le type d'explosif et compris pourquoi les estimations précédentes divergeaient. Pour confronter nos calculs aux observations, nous avons sélectionné quatre types de données. D'abord l'évolution de la boule de feu juste après la détonation, qui renseigne sur les premiers instants de l'explosion. Ensuite les dégâts sur les bâtiments, notamment sur les silos à grains au voisinage de l'entrepôt. Puis les temps d'arrivée de l'onde de choc sur des bâtiments plus éloignés de la ville de Beyrouth, mesurés à partir des différentes vidéos. Enfin l'évolution du nuage de condensation dans la zone de dépression qui suit l'onde de choc (FIGURE 1).

Pour interpréter ces données, la plupart des équipes choisissent un modèle d'explosif classique de type militaire basé seulement sur le TNT. De notre côté, nous avons utilisé un modèle couvrant différents types d'explosifs et plus adapté aux configurations accidentelles.

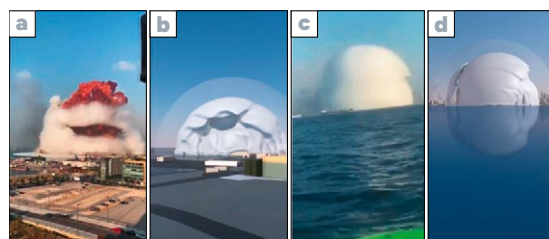
Nos calculs ont été réalisés en suivant une approche dite multifidélité [3] avec le code Héra, développé au CEA-DAM. Quatorze mille simulations rapides ont été effectuées pour différents types d'explosifs en considérant une géométrie simplifiée de l'environnement à une dimension : chaque calcul dure une poignée de secondes sur un seul processeur. Ces simulations ont été « recalées » avec sept simulations plus précises à trois dimensions, en modélisant la ville entière de Beyrouth sur des milliards de mailles de calcul réparties sur plus de cent mille processeurs : dans ce cas, une simulation dure cinq jours sur le supercalculateur Exa 1 du CEA-DAM (soit seize millions d'heures CPU) [1].

Chaque simulation est ensuite comparée aux observations réelles. Grâce à une méthode

probabiliste, il devient possible de déterminer les types d'explosifs les plus à même de rendre compte des observations. On obtient alors une énergie comprise entre 250 et 410 tonnes d'équivalent TNT (FIGURE 2), avec 320 tonnes pour la valeur la plus probable. Nous avons enfin vérifié grâce à un calcul à trois dimensions que cette dernière valeur permet bien de retrouver des observations qualitatives telles que la forme du nuage de condensation illustrée sur la FIGURE 3.

L'estimation ainsi obtenue est plutôt basse, ce qui nous amène à penser que les estimations hautes sont biaisées par le choix d'un mauvais type d'explosif. Notre estimation tend aussi à indiquer que seul un tiers du nitrate d'ammonium initialement présent a contribué à la détonation. Qu'est-il arrivé aux deux autres tiers ? Ont-ils été déplacés, volés, revendus ? Seule une enquête pourra le déterminer. Ce qui est certain, c'est que le type d'explosif impliqué ne correspond pas à un explosif de qualité militaire, encore moins à une explosion nucléaire. Il s'agit bien d'un explosif de qualité dégradée, ce qui accrédite la thèse d'une explosion accidentelle.

FIGURE 3



—> Comparaisons entre [a,c] les vidéos de l'explosion et [b,d] la simulation numérique, selon deux prises de vues distinctes. Nos calculs reproduisent les observations de manière satisfaisante. En rouge sur la figure [a] apparaît la gerbe des produits de détonation résultant de la combustion du nitrate d'ammonium.

RÉFÉRENCES

- 1 — S. Terrana, S. Jaouen, F. Duboc « Numerical simulation of blast wave Propagation in a large urban environment: The 2020 Beirut explosion », *Proceedings of the 34th International Symposium on Shock Waves, Volume 3: Applications 2: ISSW34*, 16-21 juillet 2023, Daegu, South Korea, Springer Nature, p. 327-337 (2025).
- 2 — S. Terrana, O. Gainville « Probabilistic yield estimation of the 2020 Beirut explosion », *Proceedings of the 19th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures (ISIEMS)*, 9-13 décembre 2024, Bonn, Allemagne (2024).
- 3 — C. Cannamela et al. « Construction d'un métamodèle pour des codes à plusieurs niveaux de fidélité », *Maîtrise des incertitudes, revue chocs*, 48, p. 5-14 (2017).



N. Castagnet, F. Escudié CEA - DAM, centre de Gramat

A. Boyer Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (Laas), UPR 8001 CNRS – Université de Toulouse – Institut national polytechnique de Toulouse, Laboratoire de recherche conventionné Licur, Toulouse

Caractérisation d'antenne pour la recherche de vulnérabilité des systèmes électroniques

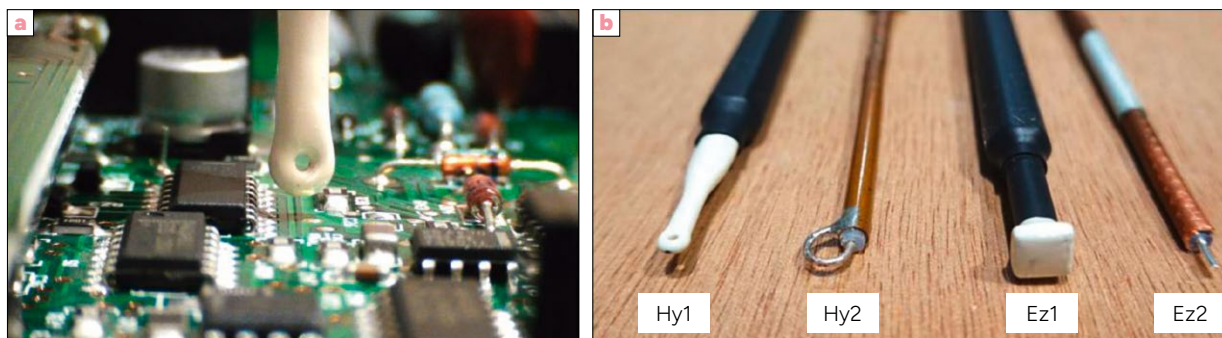
Des travaux de recherche menés conjointement par le centre CEA - DAM de Gramat et le Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (Laas) du CNRS, à Toulouse, ont permis d'étalonner des antennes utilisées pour la détection de vulnérabilité des cartes électroniques [1]. Aujourd'hui, la méthode de recherche sans contact permet non seulement d'identifier le composant défaillant, mais aussi de déterminer son seuil de défaillance.

Le centre CEA-DAM de Gramat évalue la réaction des systèmes ou cartes électroniques face aux agressions électromagnétiques intentionnelles. De cette manière, il vérifie la tenue des systèmes face à une arme électromagnétique et identifie leurs faiblesses afin de les corriger. Dès qu'un système présente une défaillance, les équipes de Gramat recherchent l'origine du défaut. Cependant, les cartes électroniques

sont de plus en plus compactes et complexes, rendant la compréhension de leurs mécanismes de défaillance de plus en plus fastidieuse.

Pour rechercher d'éventuels défauts, une antenne millimétrique, voire micrométrique, est déplacée d'une extrémité à l'autre d'une carte électronique, à quelques millimètres au-dessus des composants; elle crée sans contact une perturbation localisée, comme l'illustre

FIGURE 1



—> [a] Photographie d'une antenne magnétique miniature (verticale au-dessus de la carte) positionnée à quelques millimètres d'une carte électronique. L'antenne induit localement une perturbation électromagnétique afin de tester la vulnérabilité des composants. Cette approche permet de cibler une zone précise d'une carte électronique et non l'ensemble. [b] Photographie des antennes de type magnétique pour Hy1 et Hy2, et de type électrique pour Ez1 et Ez2.

la **FIGURE 1a**. Elle permet ainsi de révéler les zones sensibles et de cibler le composant vulnérable, talon d'Achille de la carte. Toutefois, cette technique était encore récemment limitée à une observation qualitative; aussi les équipes de Gramat ont-elles développé une procédure permettant d'étalonner l'antenne. Il est désormais possible non seulement d'identifier le composant vulnérable, mais aussi de déterminer la tension minimale, induite à ses bornes, qui engendre la défaillance.

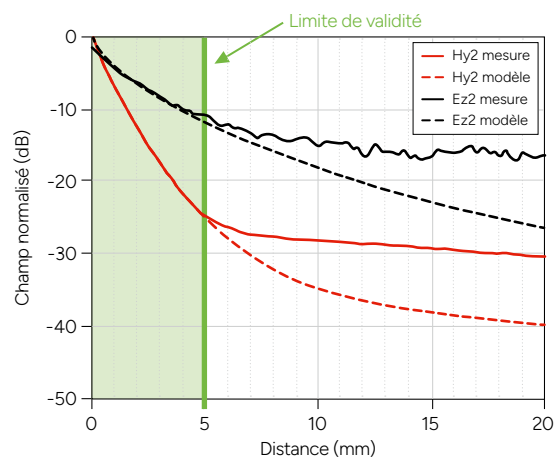
Une onde électromagnétique est la combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique se propageant dans l'espace. Pour comprendre le mécanisme de défaillance dû à une agression électromagnétique, nous devons étudier l'impact de ces deux composantes. Il existe principalement deux types d'antennes pour cette analyse, identifiables par leur géométrie et par le type de champ qu'elles rayonnent. Sur la **FIGURE 1b**, les antennes Hy1 et Hy2 sont des antennes à boucle: elles rayonnent un champ magnétique lorsqu'elles sont parcourues par un courant. Les antennes Ez1 et Ez2 ont une géométrie qui leur permet de rayonner un champ électrique.

Pour quantifier la vulnérabilité d'un composant électronique, il est possible de déterminer le seuil de défaillance en tension appliquée à ses bornes. Pour cela, il faut au préalable étalonner l'antenne. À cette fin, nous utilisons un banc de caractérisation qui permet de positionner l'antenne à calibrer au-dessus d'un capteur de référence, situé en lieu et place d'un composant électronique. Pour une puissance injectée dans l'antenne et à une fréquence données, ce capteur détermine le champ rayonné, à la position où il se trouve par rapport à l'antenne. En renouvelant la mesure pour différentes positions, on obtient le champ électromagnétique rayonné par l'antenne en tout point de l'espace. Reste à traduire ce champ en tension aux bornes d'un composant.

Pour concevoir une carte électronique, comprendre son fonctionnement ou le comportement d'un composant, la simulation numérique est un outil précieux. Plusieurs logiciels existent, comme Spice, un logiciel libre éprouvé. En prenant en compte les caractéristiques de l'antenne, de la carte et de ses composants, nous sommes capables de déduire de la valeur du champ et de la distance à laquelle se trouve un composant la valeur de la tension à ses bornes. Ainsi, nous pouvons, à la fréquence considérée, déterminer le seuil de défaillance en tension de ce composant. La **FIGURE 2** compare le champ simulé et mesuré: l'accord est excellent jusqu'à une distance entre l'antenne et le composant de 5 mm. Cette distance correspond à la limite jusqu'à laquelle l'antenne peut être utilisée pour que le seuil de défaillance soit déterminé.

Cette approche vient compléter les outils d'analyse utilisés pour identifier un composant vulnérable et déterminer le niveau de tension maximal, en fonction de la fréquence, qu'il peut supporter avant sa défaillance. Cependant, à cause de leur géométrie, les antennes actuelles sont limitées à une fréquence d'utilisation de 4 GHz (ordre de grandeur de la fréquence de la téléphonie mobile actuelle). La conception d'antennes optimisées à plus haute fréquence permettrait d'étendre l'exploitation de la méthode au-delà de cette limite.

FIGURE 2



→ Évolution du champ électromagnétique mesuré et simulé de deux antennes (magnétique en rouge et électrique en noir) en fonction de la distance au point de mesure et pour une fréquence d'excitation de 4 GHz. L'allure décroissante correspond au comportement attendu; les écarts observés à partir d'une distance de 5 mm permettent de délimiter le domaine de validité de la méthode pour ces antennes: le seuil de défaillance en tension d'un composant pourra être déterminé en plaçant l'antenne à moins de cinq millimètres de celui-ci.

RÉFÉRENCES

- 1 N. Castagnet, A. Boyer, F. Escudié « Improving near-field probe calibration technique for immunity tests at PCB level », *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, doi : 10.1109/TEM.2025.3587406, 67(5), p. 1379-1389 (2025).
- 2 A. Boyer, N. Nolhier, F. Caignet, S. Ben Dhia « On the correlation between near-field scan immunity and radiated immunity at printed circuit board level – Part I », *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, doi : 10.1109/TEM.2022.3169183, 64(4), p. 1230-1242 (2022).



T. Abboud Imacs, X-Novation, École polytechnique, Palaiseau

Y. Beniguel IEEEA, Courbevoie

Q. Carayol, H. Steve Dassault Aviation, Saint-Cloud

J.-L. Guiraud Isae SupAéro, Toulouse

G. Kubicke DGA-MI, Rennes

M. Lecouvez CEA - DAM, centre du Cesta

P. Ratajczak Orange Innovation, Sophia Antipolis

J. Simon Onera, Toulouse

Trente ans de progrès en simulation numérique de l'électromagnétisme

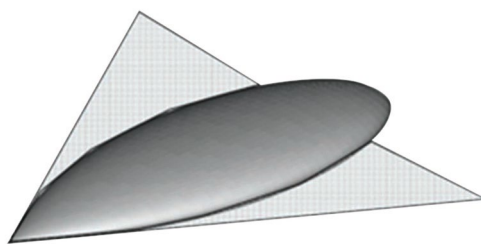
Depuis plus de trente ans, le workshop Isae, pour Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, est un rendez-vous dont l'objectif est de comparer et de valider les codes de simulation en électromagnétisme [1]. Il est organisé tous les deux ans à l'initiative de la DGA et des industriels français de la défense. Le CEA - DAM développe au profit de ses programmes ses propres codes de calcul, en particulier pour la furtivité radar des têtes nucléaires. Sa participation assidue permet de constater ses capacités toujours croissantes en matière de simulation en électromagnétisme.

Le CEA-DAM développe depuis la fin des années quatre-vingt des codes de simulation d'interaction électromagnétique pour répondre à ses propres besoins, en particulier celui d'optimiser la furtivité radar des têtes nucléaires. La simulation en électromagnétisme sur ordinateur est alors en plein essor pour les applications de défense et les industriels décident de la création du workshop Isae, avec le soutien de la Délégation générale de l'armement (DGA). L'objectif principal est la comparaison des codes de simulation pour assurer la validité des résultats, d'une part, et pour mettre en avant les méthodes novatrices dans le domaine, d'autre part. Il est aussi un forum de discussion entre développeurs de codes et utilisateurs. Après plus de trente ans d'existence, le premier datant de 1990, le workshop et ses cas test sont une vitrine de l'évolution des capacités de simulation en électromagnétisme. Ces évolutions permettent d'approcher les phénomènes physiques sur des objets de plus en plus complexes : nous pouvons désormais simuler des avions recouverts de matériaux de furtivité et équipés d'antennes, là où nous étions limités à des objets simples comme des cônes métalliques il y a trente ans. Ces progrès résultent à la fois de modèles plus précis pour représenter la physique

en jeu, de méthodes mathématiques plus efficaces et de moyens de calcul beaucoup plus puissants.

Lors des premiers workshops, les cas test étaient limités à des formes géométriques simples, comme des sphères ou des cônes, purement métalliques comme l'objet de la **FIGURE 1**. Pour calculer la furtivité de tels objets, la méthode de référence était dite asymptotique, similaire au lancer de rayons optiques ; son avantage

FIGURE 1



→ Un des premiers cas test du workshop : objet proposé par la Nasa en 1989 ayant la forme d'une amande ; pour le workshop, une aile métallique fine, en forme de triangle, a été ajoutée.

FIGURE 2



→ Cas test du workshop : [a] un drone et [b] une antenne. Le cas du drone est plus complexe du fait des détails géométriques et des multiples réflexions des ondes sur les ailes et les moteurs notamment. Le cas de l'antenne requiert un modèle spécifique pour son alimentation.

principal était le faible coût de calcul. Cependant, elle est peu précise et difficile à mettre en œuvre pour des objets plus complexes, avec des cavités ou des rebonds multiples des ondes ; elle est en outre limitée aux objets métalliques.

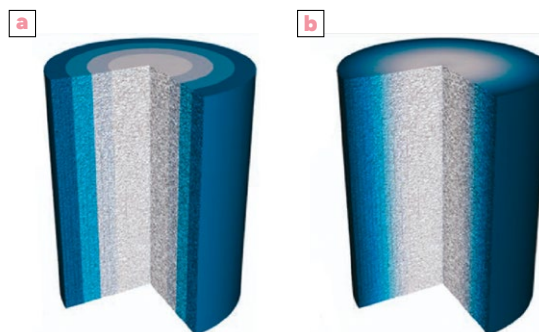
Avec l'augmentation des capacités de calcul, une nouvelle méthode mathématique est apparue : la méthode des équations intégrales. Elle ne comporte pas d'approximation des équations de Maxwell, régissant les lois de l'électromagnétisme, et est donc beaucoup plus précise. De plus, elle permet de simuler des objets de géométrie quelconque comme un avion, dont un exemple est présenté sur la **FIGURE 2a**, et de prendre en compte des matériaux furtifs, non métalliques. Cette nouvelle méthode a aussi rendu possible la simulation de nouveaux types d'objets comme les antennes et leur alimentation électrique (**FIGURE 2b**).

La méthode des équations intégrales est toutefois limitée à la prise en compte de matériaux homogènes, c'est-à-dire dont les propriétés électromagnétiques sont constantes ; un exemple est présenté sur la **FIGURE 3a**. Pour prendre en compte des matériaux hétérogènes (**FIGURE 3b**), d'autres méthodes dites volumiques, couplées aux équations intégrales, sont nécessaires. Leur coût de calcul étant néanmoins un ordre de grandeur plus élevé, il a fallu attendre l'arrivée des supercalculateurs pour en profiter pleinement.

Au fil du temps, le CEA-DAM a adapté ses codes à l'évolution des machines. Il a su s'équiper des meilleurs supercalculateurs dans le cadre du programme Simulation : des premières machines Cray totalisant huit unités de calcul pour une puissance de 2,1 GFlop/s (2,1 milliards d'opérations par seconde) au supercalculateur Exa avec ses 190 944 unités de calcul et 2 652 cartes graphiques accélératrices pour une puissance de 90 790 000 GFlop/s. Un calcul d'une heure aujourd'hui aurait nécessité 5 000 ans dans les années quatre-vingt-dix !

Le code de calcul Arlene, pour les études de furtivité, a bénéficié de toutes ces évolutions, permettant de calculer des problèmes dix fois plus grands ou dix fois plus précis tous les sept à dix ans environ. Il permet d'évaluer la furtivité de modèles de plus en plus représentatifs de têtes nucléaires, et peut aussi être utilisé pour optimiser la furtivité des têtes futures.

FIGURE 3



→ Cas test pour la simulation d'un matériau hétérogène.

[a] Le cylindre est composé de quatre couches de matériaux homogènes, chaque couche ayant des propriétés électromagnétiques différentes représentées par des couleurs distinctes. [b] Le cylindre est composé d'un matériau hétérogène dont les propriétés électromagnétiques varient continûment. Seules les méthodes volumiques, plus coûteuses en temps de calcul, permettent la simulation de matériaux hétérogènes.

RÉFÉRENCES

- [1] J.-L. Guiraud, P. Ratajczak, Y. Béniguel, Q. Carayol, H. Stève, G. Kubické, J. Simon, M. Lecouvez, T. Abboud « Benchmarking computational electromagnetics - Long-lasting collaborative effort animated by the JINA/ISAE Scientific Committee », *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, <https://doi.org/10.1109/MAP.2025.3537411>, 67(2), p. 32-42 (2025).



T. Braure, D. Hateau, V. Brandon, K. Ginsburger CEA - DAM, DAM Île-de-France
D. Lazaro CEA - List, Saclay

Quand l'intelligence artificielle améliore le traitement d'images radiographiques

Des chercheurs du CEA - DAM qui s'intéressent à l'imagerie médicale, c'est surprenant ! Et pourtant, une équipe rassemblant le CEA - DAM et le CEA - DES vient d'obtenir des résultats prometteurs sur le traitement d'images radiographiques à l'aide de l'intelligence artificielle (IA) [1]. Ils ont montré que l'on pouvait fortement améliorer la qualité des scanners médicaux par des techniques d'apprentissage même avec très peu de données d'entraînement. Au-delà du domaine médical, l'objectif des chercheurs est d'améliorer le traitement de radiographies obtenues avec l'installation Epure [2], destinée à valider des simulations numériques contribuant à la garantie des performances des armes nucléaires françaises.

En médecine, le scanner (aussi appelé CT-scan) est un outil essentiel exploitant des radiographies pour établir des diagnostics précis en visualisant des structures anatomiques à trois dimensions. Il est toutefois important de minimiser la quantité de rayons X reçus par les patients, notamment les plus fragiles, sans trop dégrader la qualité des images. La diminution du nombre de prises de vue radiographiques permet aussi de raccourcir les temps d'examen et de traiter quotidiennement un plus grand nombre de patients. Dans tous les cas, il s'agit *in fine* de tirer le maximum d'information d'un petit nombre d'images radiographiques.

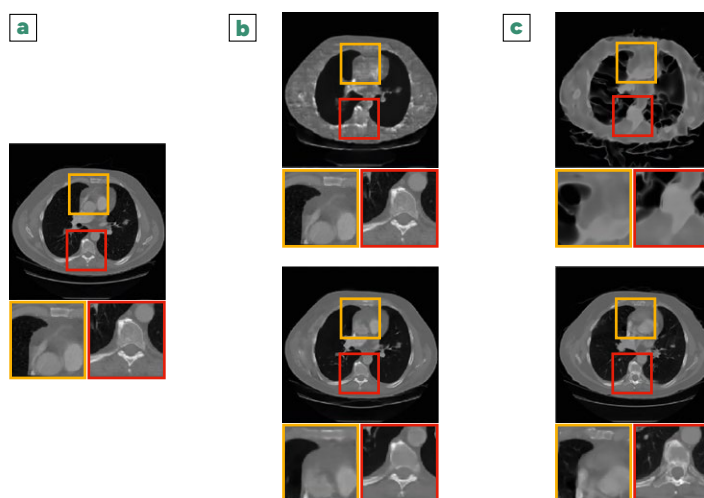
Pour améliorer ces images en utilisant l'intelligence artificielle (IA), il est nécessaire d'entraîner un modèle. Mais cela nécessite habituellement de grands volumes d'images, ce qui est difficilement envisageable dans le domaine médical. En outre, dans une configuration défavorable, c'est-à-dire avec très peu de prises de vue, les approches génératives peuvent « halluciner », c'est-à-dire ajouter ou déformer des structures en s'éloignant de l'image réelle.

La stratégie retenue [1] apporte une solution en combinant de manière innovante deux approches

a priori éloignées. La première favorise les formes les plus vraisemblables et ne nécessite pas d'exemple d'entraînement. La seconde extrait de l'information d'un grand nombre d'exemples d'entraînement et l'injecte pour améliorer le résultat à trois dimensions. La méthode résultante peut fonctionner sans données d'entraînement, mais peut aussi bénéficier d'un petit jeu d'exemples (quelques dizaines) pour améliorer ses performances, comme illustré pour un cas d'usage médical sur la **FIGURE 1**. Les résultats sont au rendez-vous : avec seulement neuf radiographies prises selon neuf angles de vue différents, notre modèle de traitement de données médicales n'est pas sujet aux hallucinations observées habituellement avec l'IA. L'approche que nous avons proposée permet ainsi de réduire à faible coût le nombre de radiographies nécessaire pour réaliser l'image 3D du scanner. Compte tenu du maintien de la qualité de reconstruction, et plus particulièrement l'absence de structures hallucinées, malgré un nombre réduit d'angles de vue, il s'agit d'une avancée importante pour l'imagerie médicale.

Cette approche pourra-t-elle s'appliquer au traitement des radiographies issues de l'installation Epure ? Moyen expérimental au meilleur niveau mondial

FIGURE 1



—> Coupe horizontale d'un scanner de thorax. La coupe [a] de référence, estimée à partir d'un millier d'angles de vue, sert de référence pour comparer [b] notre méthode à [c] l'état de l'art, dans deux situations différentes : (en haut) sans et (en bas) avec entraînement en s'appuyant préalablement sur quelques exemples de scanners. Des zones agrandies en rouge et jaune permettent de mieux apprécier les détails. Ces résultats sont obtenus à partir de neuf radiographies seulement (au lieu d'un millier).

situé au centre de Valduc, Epure est un élément clé du programme Simulation du CEA-DAM. Il vise à réaliser des radiographies d'un objet dense en mouvement [2]. L'enjeu des expériences est de valider une partie de la simulation numérique du fonctionnement des armes nucléaires. Plus précisément, ces expériences sont conçues pour caractériser avec la plus grande précision le comportement des matières nucléaires dans les conditions thermodynamiques extrêmes rencontrées durant la phase de compression de la matière. Elles sont nécessaires aux concepteurs d'armes et aux théoriciens pour

éprouver la validité et la pertinence des simulations numériques et des modèles physiques qu'ils développent, et ainsi démontrer qu'ils maîtrisent toute la physique en jeu et sa complexité.

Comme en médecine, le moyen Epure ne donne accès qu'à un petit nombre d'images de l'objet. En effet, l'installation ne comportait encore récemment qu'un seul axe radiographique, c'est-à-dire que nous ne pouvions radiographier l'objet que selon un seul angle. Depuis la fin de 2025, trois axes radiographiques sont disponibles, permettant de réaliser une image de l'objet selon trois angles simultanément (voir schéma de l'installation sur la FIGURE 2). Par conséquent, notre approche tirant parti de l'IA pour traiter un petit nombre d'images médicales devrait bénéficier aux images obtenues sur Epure. Des travaux complémentaires préciseront les bénéfices pour garantir des performances à la hauteur des exigences requises par le programme Simulation.

FIGURE 2



—> Représentation du hall d'expérience de l'installation Epure en vue de haut. Les trois axes radiographiques sont identifiés en violet, les détecteurs correspondants en orange et le dispositif de confinement (DCo) de la matière est entouré en rouge sur l'image. Illustration tirée de la revue *chocs focus* n° 9 [2].

RÉFÉRENCES

- 1 — T. Braure, D. Lazaro, D. Hateau, V. Brandon, K. Ginsburger « Conditioning generative latent optimization for sparse-view computed tomography image reconstruction », *Journal of Medical Imaging*, 12(2), 024004 (2025).
- 2 — Collectif du CEA - DAM *Epure, une installation scientifique pour la dissuasion nucléaire*, revue *chocs focus*, 9, <https://www-dam.cea.fr/dam/Publications/Focus-9/index.html>, 44 pages (2025).



J. G. Moreau, C. Rouyer, N. Blanchot, X. Ribeyre, J. Neauport CEA - DAM, centre du Cesta

C. Rousseaux, D. Penninckx, A. Fusaro, P. Loiseau, G. Riazuelo CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

S. Baton, L. Lancia Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (Luli), UMR 7605 CNRS - CEA - Sorbonne Université - École polytechnique, Palaiseau

Optimiser le dépôt d'énergie laser sur les cibles d'expériences

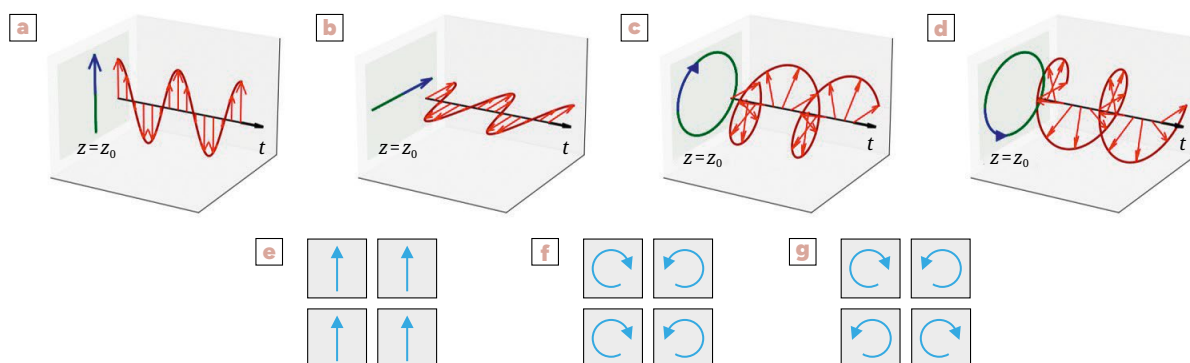
Optimiser le dépôt d'énergie du laser sur sa cible sans détériorer les installations: tel est le défi lancé aux physiciens travaillant sur le Laser Mégajoule. Une équipe rassemblant des chercheurs du CEA - DAM et du Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (Luli) à l'École polytechnique a montré [1] qu'il est possible de mieux répartir le dépôt d'énergie du laser grâce à l'adaptation d'une technique dite de « lissage par double polarisation ». Pourra-t-elle s'appliquer au Laser Mégajoule ?

Les installations laser de haute énergie comme le Laser Mégajoule, près de Bordeaux, visent à porter la matière à des températures de cent millions de degrés et des pressions d'un milliard de fois la pression atmosphérique ! Elles permettent d'étudier les phénomènes se produisant au sein des armes nucléaires, des étoiles ou d'éventuelles centrales à fusion nucléaire par laser. Pour cela, de nombreux faisceaux

laser sont focalisés sur une cible de quelques millimètres. Ils ionisent la cible, créant un plasma, puis continuent d'y déposer de l'énergie, créant des conditions de pression et de température extrêmes.

Cependant, ces zones où le laser dépose son énergie dans le plasma sont aussi le lieu d'instabilités. Dans le plasma, il existe des zones plus ou moins denses en ions et en électrons, qui oscillent, formant ainsi

FIGURE 1



—> (En haut) Représentation de quatre exemples de faisceaux laser pour lesquels on trace les oscillations (en rouge) du champ électrique de l'onde laser en un point $z = z_0$ au cours du temps (axe t en noir), ce qui nous montre son état de polarisation (la direction d'oscillation) du champ électrique: [a] rectiligne vertical, [b] rectiligne horizontal, [c] circulaire droit, [d] circulaire gauche. (En bas) Représentation symbolique d'un quadruplet de faisceaux laser avec sa géométrie carrée et son état de polarisation (flèche bleue): [e] configuration actuelle d'un quadruplet de faisceaux du Laser Mégajoule; [f,g] deux exemples d'implantation du lissage par double polarisation sur les quadruplets du Laser Mégajoule, en répartissant des états de polarisation orthogonaux (circulaire droite ou circulaire gauche) pour les quatre faisceaux laser.

des ondes. Lorsque ces ondes ioniques et électroniques interagissent avec le laser, les instabilités se développent, avec des inconvénients majeurs : on maîtrise moins bien le dépôt d'énergie sur la cible, et de la lumière peut même être réémise vers le laser et endommager les installations. Pour éviter ces inconvénients, des techniques de modification des propriétés des faisceaux laser ont été développées. L'une de ces techniques s'appelle le lissage par double polarisation.

Rappelons tout d'abord qu'un faisceau laser est une onde électromagnétique composée d'un champ électrique qui oscille dans le plan transverse à son axe de propagation. Pour certains de ces faisceaux, la direction d'oscillation est fixe : rectiligne verticale (FIGURE 1a) ou rectiligne horizontale (FIGURE 1b) ; pour d'autres, le champ tourne dans le plan transverse au cours du temps : circulaire droite (FIGURE 1c) ou circulaire gauche (FIGURE 1d). La nature de l'oscillation caractérise ce qui est appelé l'état de polarisation du faisceau laser.

Le lissage par double polarisation [2] consiste à répartir l'énergie d'un faisceau laser selon deux états de polarisation, orthogonaux l'un par rapport à l'autre : FIGURE 1a et FIGURE 1b ou bien FIGURE 1c et FIGURE 1d par exemple. De cette manière, les dépôts d'énergie sur la cible n'interfèrent pas et les instabilités néfastes sont minimisées.

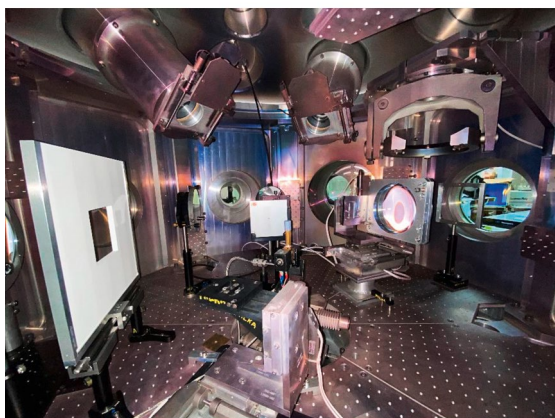
Sur le Laser Mégajoule, les faisceaux sont regroupés par quatre, constituant des quadruplets. Le lissage par double polarisation n'est pas mis en œuvre, de sorte que chaque faisceau d'un quadruplet

possède un seul et même état de polarisation : rectiligne vertical (FIGURE 1e). Pour envisager une modification de l'état de polarisation, des limites physiques et technologiques imposent d'utiliser un composant comportant des reliefs minuscules, de l'ordre du nanomètre – un composant « nanostructuré ». Ce composant conduit à changer l'état de polarisation rectiligne en une polarisation circulaire. Deux configurations de réalisation du lissage par double polarisation, envisageables sur le Laser Mégajoule, sont représentées sur les FIGURES 1f et 1g. La question qui se pose est alors la suivante : l'interaction entre un faisceau laser et un plasma est-elle identique lorsque le faisceau laser présente une polarisation circulaire (FIGURE 1c,d) ou lorsqu'il présente une polarisation rectiligne (FIGURE 1a,b) ?

Une équipe de chercheurs du CEA-DAM et du Luli a mené une campagne d'expériences [1] et réalisé des simulations pour montrer que tel est effectivement le cas. Les résultats obtenus grâce à cette campagne d'expériences (FIGURE 2) et ces simulations offrent une solution envisageable pour déployer le lissage par double polarisation sur le Laser Mégajoule. Au-delà, c'est un guide pour la conception du lissage d'une future installation laser de puissance. Cela conforte également l'intérêt des composants nanostructurés, comme ceux décrits dans la référence [3]. Ils offrent en plus l'opportunité de limiter l'endommagement dans le volume des composants optiques qui font l'étanchéité de la chambre d'expérience, sans affecter l'interaction laser-plasma.

Des travaux sont nécessaires pour démontrer que ces composants peuvent être fabriqués en grande dimension à un coût raisonnable et pour étudier de façon plus précise leur impact sur le système laser du Laser Mégajoule.

FIGURE 2



→ Photographie du dispositif expérimental au Luli, à Palaiseau, qui a permis de vérifier que l'interaction entre un faisceau laser et un plasma est identique lorsque le faisceau laser présente une polarisation circulaire ou lorsqu'il présente une polarisation rectiligne, offrant une solution envisageable pour déployer le lissage par double polarisation sur le Laser Mégajoule.

RÉFÉRENCES

- 1 — J. G. Moreau, N. Blanchot, C. Rousseaux et al.
« Stimulated Brillouin scattering dependence on polarization state, speckle shape, and polarization smoothing implementation », *Physics of Plasmas*, <https://doi.org/10.1063/5.0238070>, 32, 032102 (2025).
- 2 — E. M. Epperlein *LLE Review Quarterly Report*, USDOE, vol. 45, 65 pages (1990).
- 3 — N. Bonod, P. Brianceau, J. Daurios, S. Grosjean, N. Roquin, J.-F. Gleyze, L. Lamaignère, J. Neauport
« Laser Mégajoule : des motifs nanométriques pour plus de puissance », *revue chocs avancées*, 18, p. 38-39 (2024).



Y. Losset CEA - DAM, centre de Valduc

N. Baglan*, A. Ritt* CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

C. Dalencourt Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection, Orsay

M. Crozet CEA - DES, Marcoule

Le blé, référence métrologique internationale pour la mesure du tritium

Une équipe du CEA - DAM, en collaboration avec l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection, a réalisé la qualification d'un matériau, considéré aujourd'hui comme étalon primaire pour la mesure du tritium. Ce matériau de référence, sollicité en France et à l'étranger, permet désormais à tout laboratoire d'étalonner ses méthodes d'analyse du tritium afin de garantir la qualité des résultats obtenus [1].

Le tritium est une forme radioactive de l'hydrogène naturellement présente dans l'environnement. Il est également produit par certaines activités humaines comme l'industrie nucléaire. Par désintégration radioactive (demi-vie de 12 ans), il se transforme progressivement en hélium, un gaz inoffensif, en émettant un faible rayonnement. Ce rayonnement peut néanmoins être dangereux lorsque le tritium est ingéré, inhalé ou intégré dans l'organisme, car il affecte les cellules.

Surveiller la présence de tritium dans l'environnement est ainsi un enjeu sanitaire important. Dans l'industrie nucléaire, les rejets de tritium sont systématiquement surveillés, en particulier sous sa forme liée organiquement aux sols, aux plantes ou aux animaux. Une méthode utilisée pour la mesure de la teneur en tritium consiste à détecter la lumière émise lorsque le rayonnement produit par sa désintégration traverse un matériau scintillateur; une autre méthode consiste à mesurer la quantité de gaz hélium produit par cette transformation, par spectrométrie de masse.

Pour vérifier que les résultats sont cohérents d'un laboratoire à l'autre, des comparaisons interlaboratoires sont régulièrement organisées. En 1998, une intercomparaison menée au Canada sur des plantes a montré des écarts importants, mettant en évidence la nécessité d'améliorer la qualité des analyses. Par ailleurs, des études menées en France entre 2001 et 2010 ont permis de confirmer

qu'une meilleure standardisation des techniques de mesure conduisait à des résultats plus homogènes.

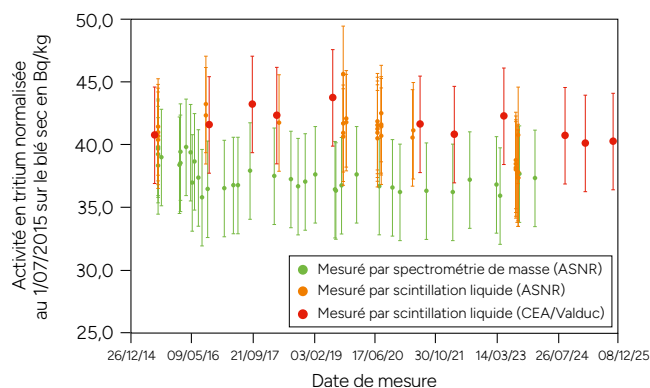
Une difficulté supplémentaire rencontrée lors des intercomparaisons tenait à l'absence de matériau de référence, c'est-à-dire d'un « mètre étalon » pour la mesure du tritium. Pour y remédier, le CEA-DAM et l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR), en s'appuyant sur des normes françaises, ont lancé et conduit

FIGURE 1



→ Grains de blé de l'échantillon marqué au tritium, et représentation schématique de leur composition moléculaire, dominée par des biomolécules organiques constituées d'atomes de carbone (en noir), d'hydrogène (en vert), d'oxygène (en bleu), associées à des atomes de tritium (en rouge).

FIGURE 2



—> Évaluation de la stabilité temporelle de la concentration en tritium du matériau de référence, entre 2015 et 2025, par le centre CEA-DAM de Valduc (scintillation liquide, en rouge) et par l'ASNR à Orsay (spectrométrie de masse, en vert ; scintillation liquide, en orange). Les valeurs de concentration ont été corrigées de la décroissance radioactive.

le processus de certification d'un échantillon de blé marqué au tritium (FIGURE 1), en y associant des laboratoires français (CEA, EDF, etc.) et étrangers (Canada, Sloénie, Roumanie, etc.). Celui-ci est désormais considéré comme étalon primaire pour la mesure du tritium et peut servir de référence commune à tous les laboratoires qui le souhaitent.

C'est ainsi que nos grains de blé ont rencontré un vif succès en France comme à l'étranger pour l'étalonnage des méthodes d'analyse du tritium. Ils ont par exemple été exportés à l'Institut européen Laue-Langevin, à Grenoble, à l'AIEA, à Vienne, en Autriche, et jusqu'à Hong Kong. Les nombreuses commandes illustrent l'importance de ce matériau pour la communauté scientifique et le rôle du CEA dans son soutien métrologique aux laboratoires d'analyse, en France et dans le monde.

Certification du matériau de référence

Initialement, en 2015, nous nous sommes procuré un échantillon de 50 kg de grains de blé marqués au tritium. Dans un premier temps, quelques grains ont été transmis à chaque laboratoire associé en France et à l'étranger. Pour assurer la fiabilité et la cohérence des résultats entre laboratoires, des méthodes de référence et des normes standardisées [2] ont été utilisées : elles ont permis de garantir que les mesures du tritium dans le blé sont précises, conformes aux standards reconnus et reliées à des étalons internationaux. À l'issue des mesures, puis de l'intercomparaison des résultats, une valeur consensuelle de teneur en tritium a été établie. Toutefois, pour que le matériau devienne un étalon primaire, encore fallait-il s'assurer de son homogénéité dans les 50 kg et de sa stabilité au cours du temps.

Au CEA-DAM, avec l'aide de l'ASNR, nous nous sommes chargés de tester l'homogénéité du matériau. Pour cela, les dizaines de kilogrammes de blé ont été réparties en sachets de 100 g conditionnés sous vide. Des prélèvements de 25 à 30 g ont été pris

aléatoirement dans de nombreux sachets et mesurés afin de les comparer : nous avons constaté qu'aux incertitudes de mesure près, la teneur en tritium était la même dans tous les sachets.

Le tritium étant radioactif avec une demi-vie de 12 ans, la moitié de sa teneur disparaît tous les 12 ans. Cette disparition progressive est parfaitement connue et calculée avec une précision d'horloger. Par contre, on sait que le blé peut être altéré au cours du temps lorsqu'il demeure à température ambiante ou au contact de l'air. C'est pourquoi, afin d'assurer la traçabilité métrologique, il a été placé dans des conditions très contrôlées [3] : conservé sous vide, il est stocké dans un congélateur à -18°C . Nous avons néanmoins voulu nous assurer que ces conditions permettaient bel et bien de garantir la stabilité de l'étalon au cours du temps. La FIGURE 2 illustre nos mesures et celles de l'ASNR, réalisées par scintillation liquide et par spectrométrie de masse : les résultats montrent qu'aucune dégradation du matériau n'est constatée sur une période de dix ans.

Grâce à l'application de méthodes normalisées d'étalonnage, de caractérisation et de traçabilité, le matériau étudié est désormais un matériau de référence certifié. Il est stable, homogène et sa teneur en tritium est certifiée précisément. Il permet à tout laboratoire de tester ses méthodes d'analyse et, une fois raccordées à l'étalon, de garantir des résultats précis, justes et reproductibles, contribuant à améliorer la surveillance de l'environnement.

RÉFÉRENCES

- [1] M. Crozet et al. « First wheat certified reference material for organically bound tritium measurement in the environment », *Talanta*, **286**, 127715 (2025).
- [2] Afnor Méthode d'essai pour l'analyse du tritium de l'eau libre et du tritium organiquement lié, NF M60-824.
- [3] Afnor Mesurage de la radioactivité dans l'environnement – Bioindicateurs – Partie 1 : Recommandations générales pour l'échantillonnage, le conditionnement et le prétraitement, NF EN 18510-1.



A. Le Pichon, J. Vergoz, G. Mazet-Roux CEA-DAM, centre DAM Île-de-France

A. Egal Department of Physics and Astronomy, The University of Western Ontario, Canada

Neuf secondes dans le ciel normand : une enquête multitechnologique sur l'astéroïde 2023 CX1

Dans la nuit du 13 février 2023, un astéroïde de la taille d'un ballon de plage s'est désintégré dans le ciel de Normandie. Bref et spectaculaire, l'événement aurait pu n'être qu'un éclair de plus dans le ciel nocturne. Il est devenu l'une des explosions atmosphériques les mieux comprises de l'histoire récente grâce à la richesse et à la cohérence exceptionnelles des données recueillies. Une analyse multitechnologique portée par 67 instituts internationaux a mis en évidence un mode de fragmentation rare et marque une avancée majeure pour la défense planétaire [1].

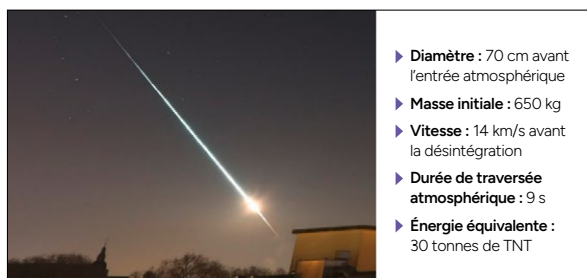
Un astéroïde, noté 2023 CX1, a traversé l'atmosphère et des fragments ont percuté la Normandie le 13 février 2023. Grâce à une analyse d'observations optiques, sismiques, infrasonores et à une analyse de fragments récupérés au sol, son histoire a été reconstituée, permettant de remonter à ses caractéristiques (FIGURE 1). La convergence de méthodes indépendantes a transformé neuf

secondes de lumière dans le ciel en l'un des événements d'impact atmosphérique les mieux caractérisés à ce jour. L'application à cet événement des méthodes développées au CEA-DAM démontre leur pertinence pour l'étude des phénomènes extrêmes.

Tout commence lorsque 2023 CX1 est repéré sur les écrans de l'observatoire astronomique de Konkoly en Hongrie, sept heures avant son entrée dans l'atmosphère. À cet instant, il n'est encore qu'un faible point lumineux. 2023 CX1 a été rapidement identifié comme un objet géocroiseur sur une trajectoire de collision avec la Terre. Son orbite, l'instant et la zone d'entrée atmosphérique ont été calculés avec une précision remarquable pour un objet de cette taille. Grâce à son réseau d'une centaine de caméras et de capteurs radio surveillant le ciel en continu, le réseau national français Fripon/Vigie-Ciel a enregistré l'événement. La mobilisation exceptionnelle du grand public a également permis de collecter de nombreuses images de la rentrée atmosphérique de l'astéroïde, contribuant à la reconstitution de la trajectoire et au calcul des zones probables de chute.

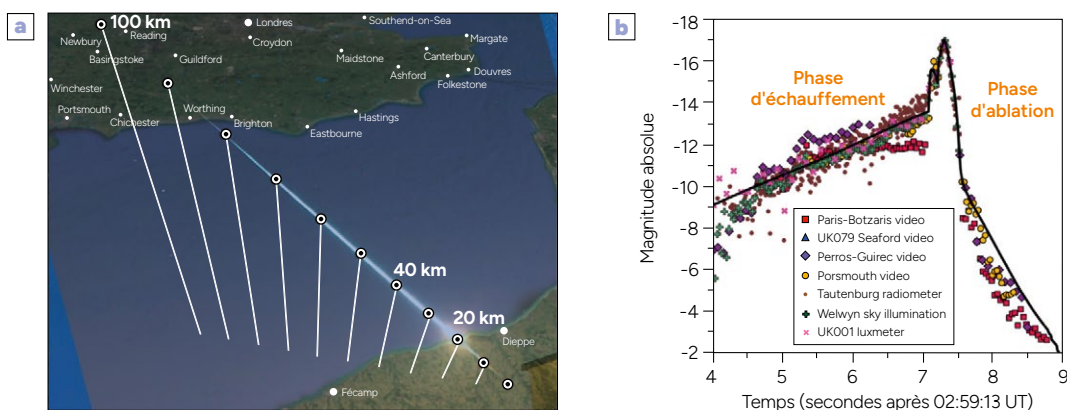
Les analyses ont bénéficié de l'expertise du CEA-DAM, acquise depuis plus de vingt ans dans le traitement automatique des mesures sismiques et infrasonores. Développés initialement pour la mission de surveillance

FIGURE 1



—> Carte d'identité de l'astéroïde 2023 CX1. À gauche, photographie de l'astéroïde 2023 CX1 prise depuis l'observatoire astronomique de Konkoly en Hongrie (© D. Legangneux).

FIGURE 2



—> [a] Représentation idéalisée de la trajectoire 2023 CX1 entre sa première observation optique (altitude de 101 km) et son point de désintégration à 28 km (© S. Anghel). [b] Luminosité observée (symboles), exprimée en magnitude visuelle, et modélisée (trait noir) à l'aide d'un modèle hydrodynamique de fragmentation [1] : le modèle reproduit bien les observations. Les symboles indiquent des données provenant de différents instruments.

du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Tice), ces outils permettent de détecter, de localiser et de caractériser en temps réel des sources énergétiques atmosphériques à partir d'un réseau mondial de stations infrasonores [2,3].

Lors de son freinage atmosphérique, 2023 CX1 s'est fragmenté, libérant une partie de son énergie en ondes de choc acoustiques. Le signal infrasonore associé à l'explosion a été détecté par plusieurs stations françaises et du système international de surveillance du Tice. En atteignant le sol, les infrasons se sont partiellement convertis en ondes sismiques. Cette réponse sismique a été enregistrée par le réseau sismologique français de l'infrastructure de recherche nationale Epos (*European Plate Observing System*) à laquelle le CEA-DAM contribue.

La FIGURE 2 présente la courbe de luminosité reconstruite à partir des observations optiques multiangulaires. La luminosité a augmenté progressivement durant les quatre premières secondes, au cours de la phase d'échauffement du corps, avant le début d'une ablation intense. La luminosité maximale a été atteinte vers 28 km d'altitude. Le modèle reproduit avec précision la courbe de luminosité modélisée.

En combinant les temps d'arrivée des infrasons avec des modèles atmosphériques tridimensionnels, la localisation et l'altitude de l'explosion concordent à moins d'un kilomètre près de celles obtenues par l'analyse des mesures optiques. L'analyse de la distribution temporelle et spatiale des signaux infrasonores et sismiques révèle une géométrie sphérique de l'onde de choc, caractéristique d'une source quasi ponctuelle. L'histoire de la rentrée de CX1 a ainsi pu être reconstituée : d'un diamètre d'environ 70 cm et d'une masse estimée à 650 ± 150 kg, l'astéroïde est entré dans l'atmosphère à une vitesse proche de 14 km/s. La désintégration s'est produite vers 28 km d'altitude, avec une libération quasi instantanée de 98 % de l'énergie cinétique. L'énergie totale libérée a été évaluée à environ 30 tonnes de TNT.

Ce mode de fragmentation est inhabituel pour des objets de cette taille. En effet, les astéroïdes comparables se fragmentent généralement de manière progressive à plus haute altitude dans l'atmosphère. Les simulations numériques couplant la dynamique de l'explosion atmosphérique à la propagation des ondes de choc montrent que ce mode de fragmentation instantanée multiplie par au moins quatre la surface au sol affectée par des surpressions significatives (vitres brisées, dommages légers), par rapport à un scénario de fragmentation classique. 2023 CX1 était trop petit pour provoquer des dégâts au sol. Cependant, pour un corps plus massif (de quelques mètres de diamètre), un tel mode de fragmentation, concentrant le dépôt d'énergie sur une portion très courte de trajectoire, pourrait causer des dommages matériels sur de vastes régions – jusqu'à 100 km de la zone d'impact.

L'étude s'est aussi intéressée à la distribution géographique des fragments, modélisée à partir de la trajectoire et des vents atmosphériques, puis confirmée par leur récupération sur le terrain : elle est typique d'une fragmentation brutale. Les analyses isotopiques et minéralogiques montrent que les fragments (appelés météorites) proviennent à la fois du cœur et de la surface de l'astéroïde, excluant un scénario d'érosion progressive, en cohérence avec l'ensemble des observations.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Egal, D. Vida, F. Colas et al. « Catastrophic disruption of asteroid 2023 CX1 and implications for planetary defence », *Nature Astronomy*, <https://doi.org/10.1038/s41550-025-02659-8>, 9, p. 1624-1637 (2025).
- [2] Collectif du CEA - DAM La détection des essais nucléaires - À l'écoute du globe, revue chocs, 50, 112 pages (2020).
- [3] A. Le Pichon, B. Poste, J. Vergoz et al. « Quand la quatrième dimension révèle l'in audible », *chocs avancées*, 18, p. 48-49 (2024).

Modification des abondances isotopiques : quand la physique nucléaire rencontre la chimie

Les isotopes d'un même élément ont le même comportement dans la grande majorité des réactions chimiques. Néanmoins, ils se distinguent dans certaines d'entre elles. Ce phénomène de dépendance isotopique apporte des renseignements précieux pour le contrôle de la prolifération nucléaire et la criminalistique nucléaire [1].

À la manière d'un code-barres, les abondances relatives des isotopes du chrome et du molybdène dans les concentrés miniers d'uranium produits industriellement permettent d'identifier de manière univoque l'origine géographique du minerai. Une telle identification pourrait devenir un outil de premier plan pour le contrôle de la prolifération nucléaire et la criminalistique nucléaire.

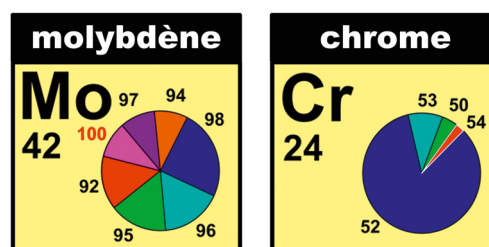
Une collaboration entre le CEA - DAM et le CNRS a mis en évidence un effet de modification des abondances isotopiques naturelles – appelé fractionnement isotopique. Cet effet avait été prévu théoriquement à la fin des années 1990. Notre étude a porté sur le molybdène et le chrome, deux éléments présents naturellement à l'état de traces dans les minerais d'uranium et possédant chacun sept et cinq isotopes stables (FIGURE 1).

La grande aventure de l'enrichissement de l'uranium et les études qui ont suivi ont montré que, dans la majorité des cas, le fractionnement isotopique varie linéairement avec la masse des isotopes : c'est le fractionnement dépendant de la masse. Il suffit de mesurer le rapport d'abondance entre deux isotopes pour caractériser ce fractionnement. Plus rarement, les variations observées ne suivent plus cette relation avec la masse : on parle alors de fractionnement isotopique indépendant

de la masse. Sa mise en évidence exige la mesure à très haute précision de l'abondance de chacun des isotopes stables de l'élément.

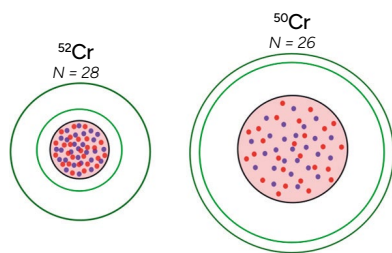
Jusqu'à présent, les fractionnements indépendants de la masse n'avaient été observés dans la nature que pour quelques éléments lourds, comme le mercure ou

FIGURE 1



→ Caractéristiques atomiques du molybdène (Mo) et du chrome (Cr). L'atome de molybdène possède dans son noyau 42 protons et un nombre variable de neutrons, conduisant aux isotopes stables de masses atomiques 92, 94, 95, 96, 97, 98 et 100. Le chrome possède 24 protons et un nombre variable de neutrons, conduisant aux isotopes stables de masses atomiques 50, 52, 53 et 54. Les abondances relatives de ces isotopes sont représentées par les différentes couleurs des camemberts. Modifié d'après www.ciaaw.org (2026).

FIGURE 2



→ Représentation schématique de l'effet de décalage du champ nucléaire pour deux isotopes du chrome. Une différence de deux neutrons seulement entre les isotopes ^{50}Cr (26 neutrons) et ^{52}Cr (28 neutrons) modifie suffisamment la taille de leurs noyaux respectifs pour que cela ait une influence significative sur la répartition spatiale des 24 électrons de cet élément. Or, les réactions chimiques échangent les électrons. Deux isotopes d'un même élément peuvent ainsi être fractionnés lorsqu'ils sont impliqués dans une même réaction chimique.

l'uranium. Les bases théoriques des fractionnements indépendants de la masse ont été établies en 1996 par Jacob Bigeleisen grâce aux progrès de la physique nucléaire et des techniques analytiques. Ce même auteur, qui travaillait sur l'enrichissement de l'uranium dans le cadre du projet Manhattan, avait formalisé dès 1947 la théorie des fractionnements dépendants de la masse.

En géochimie, les fractionnements dépendants de la masse sont largement utilisés pour identifier les processus ayant façonné la Terre. Toutefois, différents processus peuvent produire des fractionnements similaires, et des effets superposés peuvent compliquer l'interprétation [2]. L'étude des signatures isotopiques indépendantes de la masse permet de lever ces ambiguïtés, en particulier lorsque plusieurs

systèmes isotopiques, comme dans le cas du molybdène et du chrome, sont combinés.

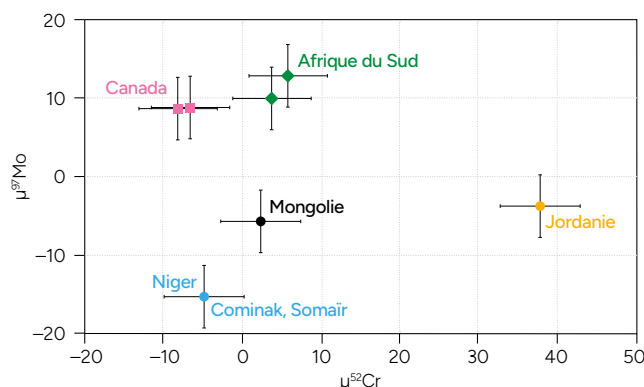
Notre étude a permis d'identifier deux types de signatures indépendantes de la masse. Le premier est un fractionnement indépendant de la masse dû à un effet de décalage du champ nucléaire. Il est lié à la taille des noyaux des atomes et au comportement que cela induit pour les électrons dans les réactions chimiques (FIGURE 2). Le deuxième est une anomalie fissiogénique : la fission spontanée de l'uranium produit certains isotopes du molybdène, dont l'abondance est alors augmentée. On l'observe notamment dans les gisements très anciens ou riches en uranium.

Ces deux types de signatures indépendantes de la masse ont été distingués avec succès, pour le molybdène et le chrome, dans des échantillons d'uranium provenant de plusieurs pays producteurs. Cela permet d'identifier sans ambiguïté l'origine des gisements à partir de la composition isotopique des minerais ou des concentrés miniers (FIGURE 3). L'approche doit être étendue à d'autres éléments, comme le samarium, pour augmenter encore le pouvoir de discrimination et garantir *in fine* que tous les gisements d'uranium du monde pourront être assortis d'un code-barres unique.

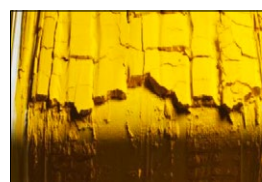
RÉFÉRENCES

- 1 C. Fitoussi, É. Pili, E. Yobregat, M. Touboul, C. Gardin « Identification of mass-independent Mo isotope anomalies in natural and industrially processed samples. Proof of concept for uranium provenance in nuclear forensics », *Earth Planet. Sci. Lett.*, **666**, 119459 (2025).
- 2 É. Pili, C. Fitoussi, E. Yobregat, B. Bourdon, V. Migeon « Potentiel du molybdène pour identifier l'origine de l'uranium », *revue chocs avancées*, **15**, p. 50-51 (2021).

FIGURE 3



Vue de la mine à ciel ouvert exploitée par la Somair au Niger.
Crédit photo : Orano.



Production de concentré minier d'uranium (yellowcake) à l'usine de la Somair au Niger.
Crédit photo : Orano.

→ Discrimination de la provenance géographique de l'uranium (minerais et concentrés miniers) par les fractionnements isotopiques indépendants de la masse des isotopes du molybdène et du chrome. La résultante des deux types de signatures isotopiques est traduite dans le graphique par un paramètre déduit des rapports d'abondances isotopiques de quatre isotopes (notations μ). La méthode d'analyse employée fournit de nombreux autres paramètres (non représentés ici) qui permettent de caractériser sans ambiguïté l'origine géographique de l'uranium, à la manière d'un code-barres. Dans le cas du Niger, les deux mines et usines productrices d'uranium, Cominak et Somair, sont alimentées par deux gisements aux caractéristiques très proches, formés pratiquement à la même époque géologique et dans les mêmes conditions.

Le plutonium est un élément au cœur des missions historiques du CEA - DAM et les scientifiques cherchent à mieux comprendre ses interactions avec les autres espèces chimiques. De récents travaux ont permis de mettre au jour des interactions entre des espèces aqueuses du plutonium et les métaux alcalins [1].

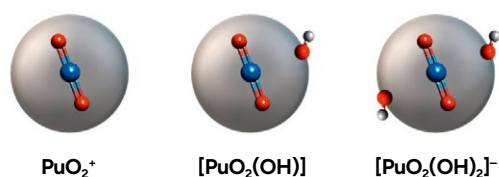
de charge unité, sont souvent considérés comme des espèces neutres chimiquement. Lorsqu'ils sont combinés avec des ions négatifs, ils forment des solides dits ioniques, autrement appelés sels.

FIGURE 1

H																	He
Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			Th	Pa	u	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

48

FIGURE 2



→ Représentation de l'ion plutonyle PuO_2^+ et des espèces chimiques qu'il forme en solution.

nécessitent de comprendre finement le comportement du plutonium en solution. Lorsqu'il est dissous dans l'eau, il peut s'oxyder à des degrés divers, ce qui rend sa chimie complexe. Ces différents degrés correspondent au nombre d'électrons perdus par l'atome. Aux concentrations extrêmement faibles présentes dans l'environnement, une forme prévaut : l'ion plutonyle, Pu^{5+} , sous la forme du composé PuO_2^+ .

En solution, des réactions d'hydrolyse se produisent : des molécules d'eau se fixent sur l'ion plutonyle en libérant un ou plusieurs ions H^+ pour former les espèces $[\text{PuO}_2(\text{OH})]$ et $[\text{PuO}_2(\text{OH})_2]^-$ (FIGURE 2). Jusqu'à récemment, on pensait que le rapport des concentrations de ces espèces ne dépendait que de l'acidité de la solution. Mais les deux seules publications disponibles sur le sujet sont discordantes : le rapport des concentrations diffère fortement d'une publication à l'autre, ce qui a créé une controverse au début des années 2000.

La seule différence entre les deux études est la nature du sel majoritaire présent dans la solution, qui a donc été soupçonné de jouer un rôle dans les réactions chimiques. Or, ces sels étaient considérés par la communauté scientifique comme neutres chimiquement. Nous nous sommes alors intéressés à l'impact des alcalins sur la chimie du plutonium en solution. Nos résultats contredisent la neutralité supposée des sels de lithium et de sodium qui agissent différemment l'un de l'autre dans les réactions d'hydrolyse ; en revanche, ils confirment la neutralité des sels de potassium, de rubidium et de césium.

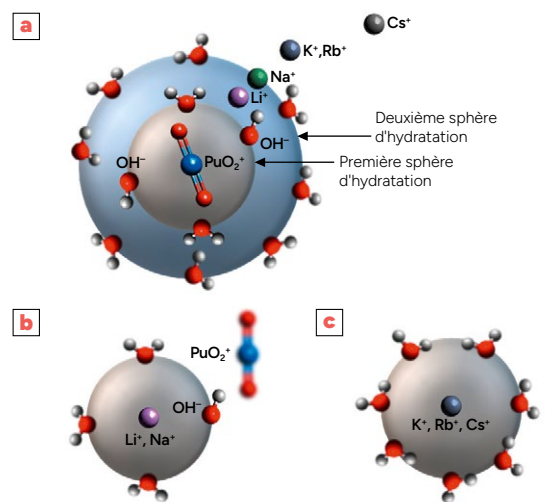
Pour comprendre pourquoi ces sels ont des effets aussi différents sur l'hydrolyse du plutonium, des simulations numériques de dynamique moléculaire quantique ont été effectuées sur supercalculateur à l'aide du code Abinit codéveloppé au CEA-DAM. Elles montrent l'environnement des espèces hydrolysées du plutonium avec la première sphère d'hydratation (molécules d'eau interagissant directement avec l'espèce chimique) et la deuxième sphère d'hydratation (molécules d'eau interagissant avec la première sphère d'hydratation). Les alcalins se placent à différentes distances du plutonium (FIGURE 3a) : le lithium se situe entre la première et la deuxième sphère d'hydratation, le sodium est dans la deuxième sphère d'hydratation, le potassium et le rubidium se positionnent

au-delà ; le césium, quant à lui, n'a pas d'interaction avec le plutonium. L'ion alcalin est d'autant plus loin du plutonium qu'il est plus gros.

Si on considère l'environnement immédiat des alcalins, on note la présence d'un hydroxyde OH^- dans la première sphère d'hydratation du lithium et du sodium (FIGURE 3b), tandis que les autres alcalins sont uniquement entourés de molécules d'eau (FIGURE 3c). Pour comprendre comment la position de ces alcalins peut changer les concentrations relatives des espèces hydrolysées, il faut se pencher sur la théorie d'Oleg Yakovlevich Samoilov, un chimiste soviétique du milieu du XX^e siècle. Elle explique que certains ions alcalins (Li^+) favorisent la dissociation des molécules d'eau (FIGURE 3b), contrairement à d'autres (Na^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+).

Dans nos milieux alcalins, le lithium Li^+ a un effet stabilisateur sur le complexe $[\text{PuO}_2(\text{OH})_2]^-$, car il s'associe à lui. *A contrario*, le sodium Na^+ affaiblit la liaison entre PuO_2^+ et OH^- , comme s'il voulait arracher ce dernier au premier et s'associer à lui. Le potassium et le rubidium sont éloignés du complexe et n'ont quasiment pas d'effet sur lui. Quant au césium, il n'interagit pas du tout. Ces résultats expliquent la divergence entre les deux premières études de l'hydrolyse du Pu (V).

FIGURE 3



→ Représentation de l'environnement chimique [a] du plutonium, [b] du lithium et du sodium ainsi que [c] du potassium, rubidium et césium obtenus lors des simulations du complexe $[\text{PuO}_2(\text{OH})_2]^-$.

RÉFÉRENCES

- 1 — G. Lasnier, B. Siberchicot, J. Aupiais
« Stabilization and destabilization of hydrolyzed pentavalent actinide complexes by alkali metals », *Inorg. Chem.*, doi : 10.1021/acs.inorgchem.5c03004, **64**, p. 21869-21878 (2025).



A. Briard, B.-J. Gréa, L. Oteski, O. Soulard, J. Griffond, S. Thévenin CEA - DAM, centre DAM Île-de-France
L. Danaila Université Rouen Normandie, UNICAEN, CNRS, M2C UMR 6143, Rouen

Des simulations rapides et précises de mélanges turbulents

Les écoulements turbulents, chaotiques, forment des tourbillons interconnectés de tailles variées et sont très difficiles à simuler numériquement. Les calculs peuvent durer plusieurs jours sur des milliers d'ordinateurs en parallèle. Plusieurs chercheurs du CEA - DAM ont mis en œuvre des méthodes pour réduire d'environ 25 % le temps de calcul d'un mélange turbulent, tout en conservant une précision équivalente [1]. Et pour une perte acceptable de précision, il est même possible de diviser par trois la durée de la simulation.

Dans l'atmosphère, des nuages peuvent s'étendre sur des centaines de kilomètres et interagir, en se rapprochant du sol, avec des vagues de plusieurs mètres d'envergure, ou encore des gouttelettes de quelques millimètres. Ces interactions peuvent être courtes, de l'ordre de la milliseconde, ou durer des jours entiers. Par ailleurs, d'infimes variations de l'état initial du système peuvent engendrer des différences profondes sur le développement à long terme. Ces phénomènes sont typiques de ce qu'on appelle les écoulements turbulents : des tourbillons de toutes tailles, se déployant sur des temps très brefs ou plus longs, de manière chaotique. Cette complexité et cette richesse des écoulements turbulents rendent leur modélisation passionnante !

Au CEA-DAM, nous simulons des écoulements très turbulents dans lesquels deux fluides de densité différente se mélangent. C'est typiquement ce qu'il peut se produire dans une expérience de fusion nucléaire par confinement inertiel, ou lors d'explosions. Notre capacité à prévoir correctement le mélange turbulent est fondamentale pour les applications du CEA-DAM.

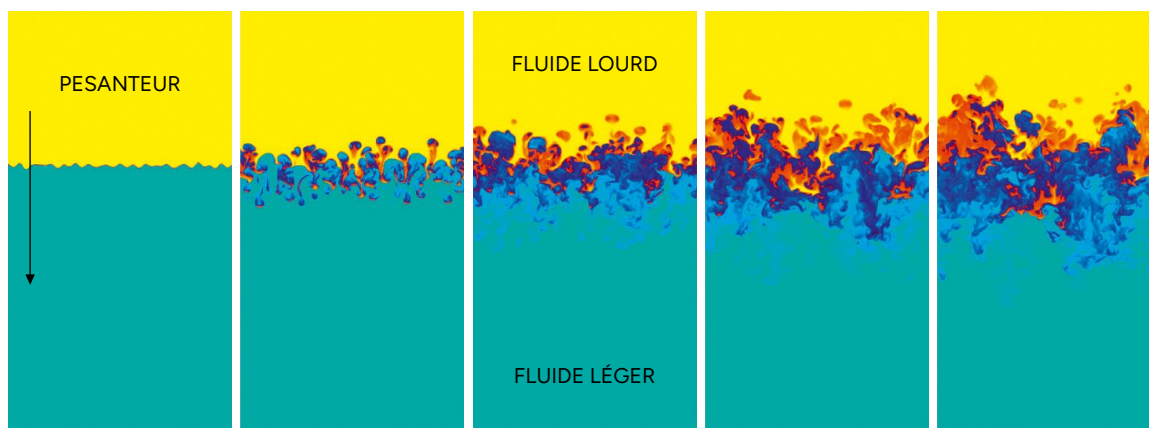
Initialement, les fluides sont au repos, séparés par une interface. Contrairement à l'exemple ci-dessus de l'atmosphère au-dessus de la mer, on considère maintenant un fluide lourd au-dessus d'un fluide léger dans un champ de pesanteur. Lorsque l'interface entre eux est perturbée, les déformations s'amplifient et créent du mélange. C'est ce qu'on appelle l'instabilité de type Rayleigh-Taylor [2]. Si on attend suffisamment longtemps, ce mélange devient turbulent.

Dans le cas où les fluides en mélange ont des densités proches, la résolution numérique des équations régissant le mouvement et la composition des fluides est relativement simple. Dans le cas où les fluides sont de nature très différente (un fluide très lourd et un fluide très léger, par exemple), il est nécessaire de résoudre des équations plus complexes. C'est ce cas qui nous intéresse. L'évolution temporelle typique est illustrée sur la **FIGURE 1**, pour un fluide lourd neuf fois plus dense que le fluide léger. Cette simulation contient environ deux milliards de cellules et a duré six jours en utilisant 4096 cœurs de calcul en parallèle.

Un beau résultat, donc, mais au prix de calculs coûteux. Car notre code de calcul, baptisé Stratospec, résout numériquement les équations du mouvement et du mélange. Il lui faut donc déterminer, à chaque instant et en tout point, la pression qui correspond à la vitesse et la densité des fluides. C'est là qu'interviennent les « solveurs de Poisson », des méthodes numériques permettant justement de calculer la pression. Cependant, ces méthodes sont souvent itératives, c'est-à-dire qu'il faut les appliquer un certain nombre de fois (chaque fois est appelée une itération) pour trouver la bonne solution... et on ne sait pas à l'avance combien de fois. Cela peut donc coûter très cher en temps de calcul.

Est-il possible de réduire le temps de calcul tout en gardant une précision suffisante ? Oui, en utilisant d'autres algorithmes dans le solveur de Poisson de Stratospec. L'algorithme utilisé aujourd'hui, nommé GMRes, pour *Generalized Minimal Residual*, est connu dans la littérature pour sa robustesse et sa fiabilité.

FIGURE 1



→ Tranche 2D d'une simulation 3D de l'instabilité de Rayleigh-Taylor représentant le champ de densité. L'interface entre le fluide lourd (jaune) et léger (bleu clair) est perturbée. Le champ de pesanteur est orienté du haut vers le bas. Au cours du temps (de gauche à droite), les perturbations s'amplifient, créant du mélange (couleurs rouge à bleu foncé) entre des structures de taille variée.

Toutefois, chaque itération supplémentaire prend beaucoup de temps de calcul. La méthode que nous avons optimisée est BICGS, pour *Bi-Conjugate Gradients Stab*, qui s'appuie sur des itérations plus rapides. Pour résumer, GMRes utilise peu d'itérations, mais chacune nécessite beaucoup de calculs, tandis que BICGS utilise plus d'itérations moins coûteuses en temps.

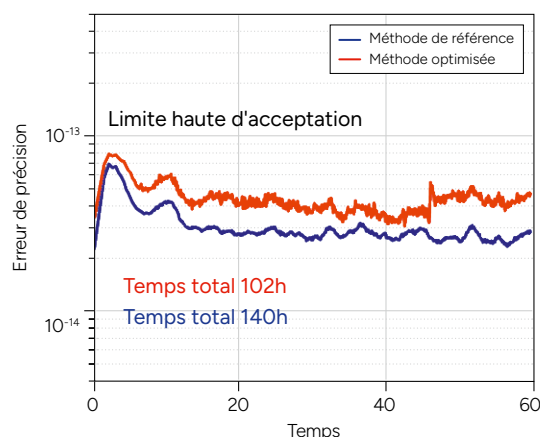
Ensuite, nous avons réduit le nombre d'itérations dans BICGS. Pour cela, nous avons mis en œuvre des optimisations qui, de manière automatique, évitent

les itérations inutiles et permettent ainsi de se sortir d'une impasse quand la précision ne s'améliore pas. En pratique, on redémarre le processus itératif, mais pas du début : on repart de la dernière meilleure étape. On accélère ainsi d'environ 25 % les calculs, sans perdre en précision sur les quantités que l'on cherche à restituer, comme illustré sur la **FIGURE 2**.

Enfin, si l'on s'intéresse seulement aux grands tourbillons (ceux qui portent l'essentiel de l'énergie), il est possible de sacrifier quelques pourcents de précision. C'est pourquoi nous avons aussi développé une méthode rapide, dans laquelle nous n'utilisons pas le solveur de Poisson à chaque itération. Nous divisons le temps de calcul par trois, ce qui est considérable.

Des adaptations dans les optimisations seront certainement à prévoir pour d'autres types d'écoulements. Néanmoins, cette étude offre des points de comparaison objectifs, une méthodologie claire et des pistes prometteuses d'amélioration de solveurs de Poisson.

FIGURE 2



→ Évolution temporelle de l'erreur de précision entre différents algorithmes pour le solveur de Poisson. Une méthode est acceptable si à chaque instant l'erreur reste en dessous de la limite haute d'acceptation. Même si la solution de référence (GMRes) reste la plus précise avec l'erreur la plus faible, la méthode optimisée (BICGS) se révèle suffisamment précise et plus de 25 % plus rapide.

RÉFÉRENCES

- 1 — A. Briard, B.-J. Gréa, L. Oteski, O. Soulard, J. Griffond, S. Thévenin, L. Danaila « Poisson solvers for strongly stratified turbulent flows », *Computers and Fluids*, 300, 106741 (2025).
- 2 — Y. Zhou « Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instability induced flow, turbulence and mixing », *Physics Reports*, 720-722, p. 1-136 (2017).



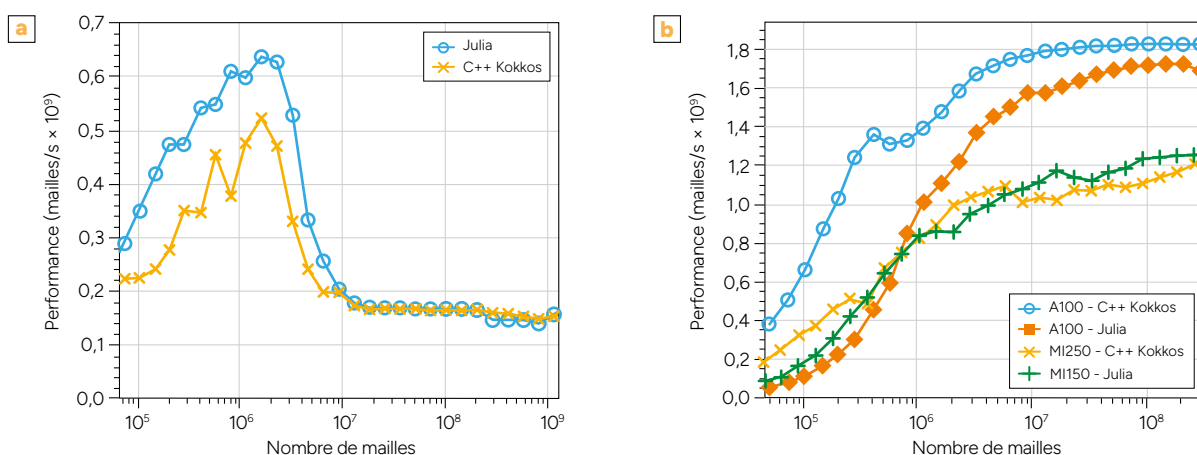
Julia : un langage de programmation pour les supercalculateurs de demain ?

Les codes de simulation doivent être adaptés pour suivre les changements fréquents d'architectures des supercalculateurs ; cela engendre un travail considérable pour les experts en développement de codes et en calcul haute performance. Pour rendre l'évolution des codes plus fluide, le CEA - DAM a exploré les capacités du langage de programmation Julia [1].

Le cycle de vie d'un code de simulation au CEA-DAM se compte souvent en décennies, alors que les supercalculateurs sont renouvelés tous les cinq à sept ans. À cette contrainte usuelle d'évolution matérielle s'est ajoutée récemment l'arrivée des cartes graphiques accélératrices de calcul (GPU). Celles-ci sont mieux adaptées à certaines simulations sur les supercalculateurs que les processeurs classiques (CPU) seuls. Utiliser l'un ou

l'autre de manière interchangeable impose désormais de disposer de modèles de programmation avancés permettant d'offrir de hautes performances dans tous les cas. Développer un code de simulation performant est un travail considérable : il devient impératif qu'il soit également portable, c'est-à-dire qu'il puisse fonctionner sur tout type de matériel d'aujourd'hui et de demain, sans travail majeur de réécriture. La portabilité devient ainsi un enjeu d'importance en calcul

FIGURE 1



→ Performances sur [a] processeur classique AMD Milan (64 cœurs de calcul) et [b] avec accélérateur GPU Nvidia A100 et accélérateur AMD MI250 des deux implémentations du solveur en fonction du nombre de mailles. À l'aide de bibliothèques développées par la communauté, Julia atteint les mêmes niveaux de performance que Kokkos, et le dépasse sur processeur classique pour les petits maillages ($< 10^7$ mailles). Sur GPU AMD, Julia égale Kokkos, ce qui n'est pas le cas sur GPU Nvidia, où il reste encore à répliquer des optimisations faites par Kokkos qui ne le sont pas en Julia.

haute performance pour l'efficacité, la pérennité et la flexibilité de codes de simulation.

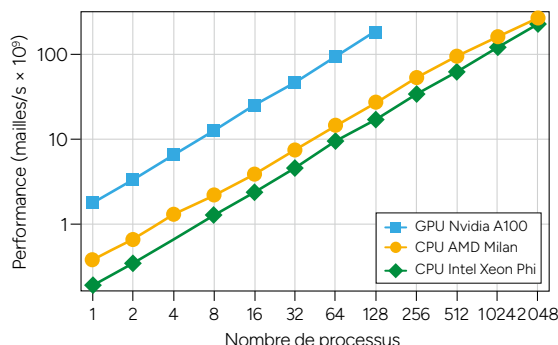
Les logiciels actuels sont majoritairement basés sur le langage C++ (p. ex. Arcane, Kokkos [2]) et toutes sont complexes, pouvant nécessiter des adaptations constantes de la part des équipes de développement. Julia, un langage de programmation conçu originellement aux États-Unis pour le calcul scientifique, a été proposé comme solution unifiant les besoins des développeurs et des utilisateurs avec des performances similaires à celles de langages comme Fortran ou C++ [3]. Grâce à ses nombreuses bibliothèques bâties par la communauté, il est utilisable sur accélérateurs GPU [4] et utilisé dans de nombreux domaines. Afin d'évaluer ce langage pour le calcul haute performance, il faut s'assurer qu'il est aussi performant que les solutions préexistantes : nous avons évalué la portabilité des performances de Julia sur plusieurs configurations matérielles de grande taille, en les comparant à celles obtenues avec C++ Kokkos [1].

Les deux langages de programmation ont été utilisés dans le cas de simulations d'écoulement de matière, importantes pour le CEA-DAM, l'objectif étant d'obtenir des performances similaires et satisfaisantes sur différents types d'architectures matérielles. Les résultats sur processeur classique (FIGURE 1a) montrent que le code écrit en Julia offre des performances très compétitives par rapport à celles obtenues avec le code C++ Kokkos. Les enjeux de portabilité sont plus importants sur accélérateurs GPU où les capacités du matériel varient fortement entre les différents constructeurs (Nvidia, AMD, etc.). La FIGURE 1b montre que C++ Kokkos et Julia peuvent tous deux utiliser efficacement des architectures d'accélérateur différentes. Contrairement à Kokkos, qui propose une solution complète pour réutiliser le même code avec ou sans accélérateur, Julia y parvient en combinant de multiples bibliothèques développées par la communauté.

Le dernier point examiné concerne les simulations à très grande échelle qui nécessitent de faire communiquer des centaines, voire des milliers, de processeurs. La solution de référence pour réaliser les communications est la bibliothèque de passage de messages MPI (*Message Passing Interface*), parfaitement compatible avec Julia : la FIGURE 2 l'illustre en utilisant 128 accélérateurs Nvidia simultanément. D'autres essais, réalisés sur plus de 2000 processeurs classiques, ont montré que l'utilisation de Julia et de ses bibliothèques pouvait certes ralentir le démarrage du calcul de quelques minutes (compilation à la volée), sans affecter toutefois les performances du reste de l'application.

Il existe donc des solutions alternatives à C++ qui garantissent la portabilité des performances

FIGURE 2



→ Mesures de performances à grande échelle en employant jusqu'à 128 GPU Nvidia A100, 512 processeurs classiques AMD Milan et 2048 processeurs Intel Xeon Phi, en utilisant le code écrit en Julia. Les processeurs se partagent équitablement le travail et doivent pour cela communiquer. Avec de grands nombres de processeurs, ces communications peuvent entraîner une perte d'efficacité et la performance n'est plus proportionnelle au nombre de processeurs.

compatible avec les usages du calcul haute performance au CEA-DAM. Par rapport au C++, Julia donne la possibilité de simplifier le travail des développeurs de codes, sans impacter négativement les capacités d'optimisation. Certes, Julia reste aujourd'hui peu utilisé dans l'industrie, car beaucoup d'outils (analyse de code, débogage, etc.) ne supportent pas correctement ce langage, ce qui réduit fortement son attractivité. Néanmoins, Julia permet d'explorer d'autres méthodes de travail grâce à la nature dynamique et interactive du langage. De telles méthodes pourraient à terme s'avérer plus adaptées à chaque type d'utilisateur en offrant une programmation plus aisée qu'actuellement.

RÉFÉRENCES

1. L. Briand, H. Jourden, M. Pérache « Julia versus C++ Kokkos for performance portable cartesian CFD solvers on heterogeneous architectures », *The International Journal of High Performance Computing Applications*, <https://doi.org/10.1177/10943420251341179>, **39**, p. 481-501 (2025).
2. C. R. Trott et al. « Kokkos 3: Programming model extensions for the exascale era », *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, <https://doi.org/10.1109/TPDS.2021.3097283>, **33**, p. 805-817 (2022).
3. J. Bezanson, A. Edelman, S. Karpinski, V. B. Shah « Julia: A fresh approach to numerical computing », *SIAM Review*, <https://doi.org/10.1137/141000671>, **59**, p. 65-98 (2017).
4. T. Besard, C. Foket, B. De Sutter « Effective extensible programming: Unleashing Julia on GPUs », *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, <https://doi.org/10.1109/TPDS.2018.2872064>, **30**, p. 827-841 (2019).



CHOCS ^{#20} **avancées**

BILAN 2025

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



JUILLET 2026

WWW-DAM.CEA.FR