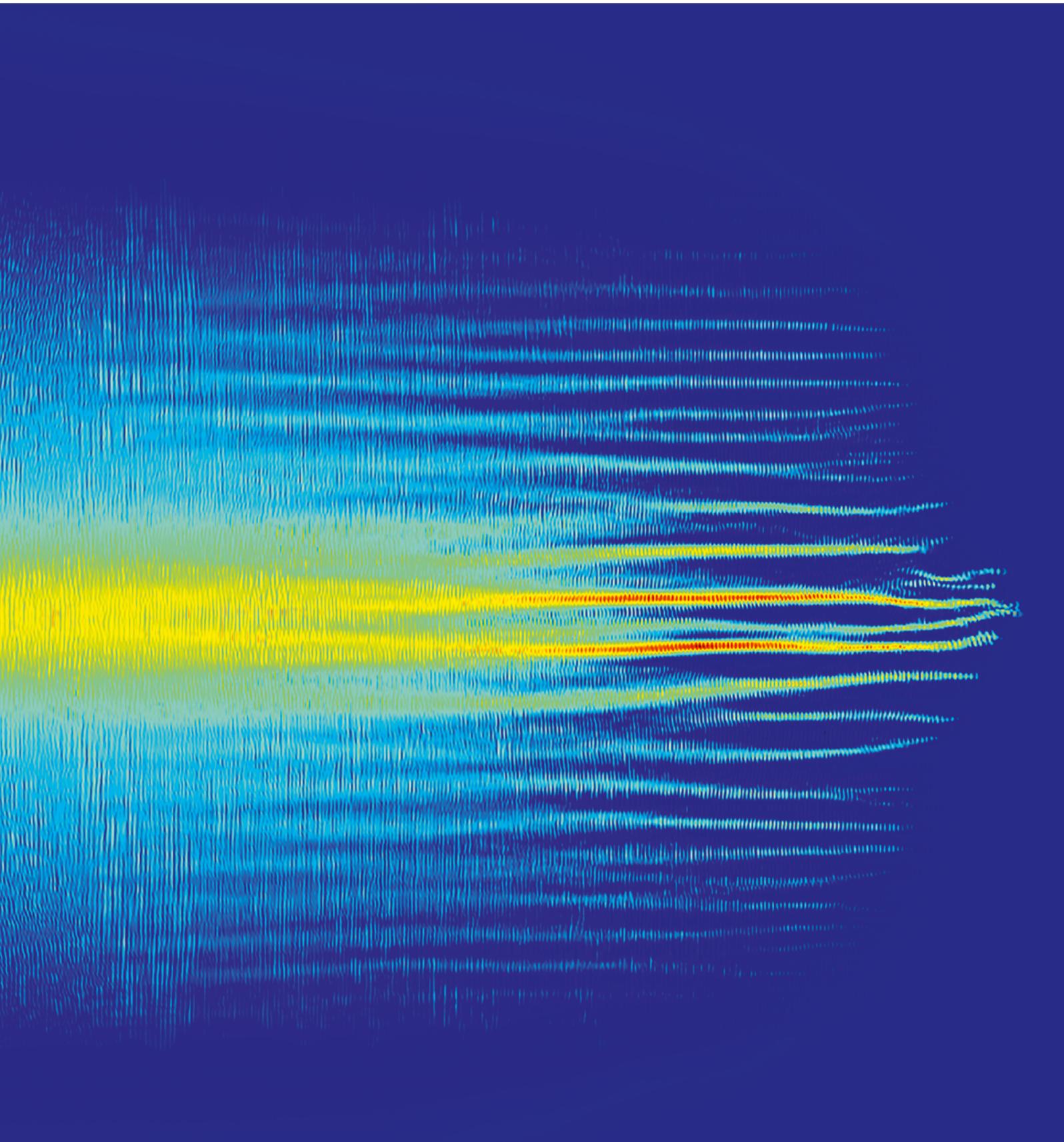
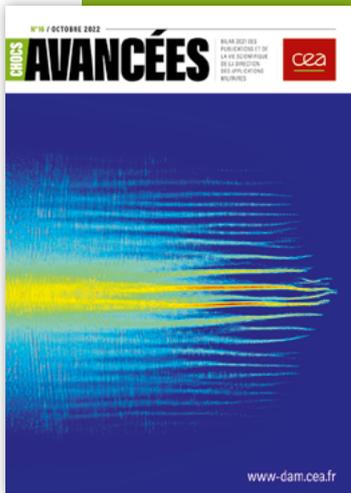


N°16 / OCTOBRE 2022

CHOCS AVANCÉES

BILAN 2021 DES
PUBLICATIONS ET DE
LA VIE SCIENTIFIQUE
DE LA DIRECTION
DES APPLICATIONS
MILITAIRES





N°16 / OCTOBRE 2022

AVANCÉES

EN COUVERTURE. Simulation de la propagation, de la gauche vers la droite, du faisceau du laser Petal dans un plasma d'aluminium vaporisé. Le faisceau laser se décompose en longs filaments quasi parallèles et chaque filament comporte des modulations verticales dont l'espacement est proche de la longueur d'onde du laser (voir p. 10-11).

Bilan 2021 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
Serge Bouquet

Comité scientifique
Nicolas Authier, Denis Autissier,
Christelle Barthet, Philippe Belleville,
Nathalie Blanchot, Daniel Bouche,
Serge Bouquet, Gilles Bourgès,
Corinne Canton-Desmeuzes, Alexis Casner,
Hélène Hébert, Jean-Christophe Joly,
Hervé Jourden, Pierre-Henri Maire,
Jean-Luc Miquel, David Riz, Éric Royer,
Virginie Silvert, Stéphanie Thiébaud,
Éric Van Renthergem

Rédacteur en chef
Jean-Marc Laborie

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

Conformité
Régine Regnault

Correction
Stylience / www.stylience.fr

Diffusion et abonnement
Régis Vîzet

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.*

La revue est consultable sur

www-dam.cea.fr

sommaire

ÉDITORIAL 02

VIE SCIENTIFIQUE 04

INTERACTION RAYONNEMENT-MATIÈRE, PHYSIQUE DES PLASMAS 10

Petal : des protons super-énergétiques pour sonder la matière.....10

D. RAFFESTIN, D. BATANI, J.-L. DUBOIS, J.-E. DUCRET, E. D'HUMIÈRES, V. TIKHONCHUK, L. LECHERBOURG, P.-É. MASSON-LABORDE, X. DAVOINE, L. GREMILLET, I. LANTUÉJOLU, B. VAUZOUR, X. VAISSEAU, A. DUVAL, C. REVERDIN, B. ROSSE, G. BOUTOUX, C. ROUSSEAU, N. BLANCHOT

Aux origines du champ magnétique interstellaire.....12

A. F. A. BOTT, L. CHEN, A. A. SCHEKOCIHIN, G. GREGORI, A. CASNER, T. CAILLAUD, L. LE DEROFF, G. BOUTOUX, A. DUVAL, I. LANTUÉJOLU, R. ROSCH, B. VAUZOUR, B. VILETTE, D. Q. LAMB, P. TZEFERACOS

De la turbulence astrophysique à celle des plasmas
créés par laser.....14

A. CASNER, É. FALIZE, L. MASSE, O. POUIJADE, G. RIGON, M. KOENIG, B. ALBERTAZZI, P. MABEY, T. MICHEL, T. VINCI, V. BOUFFETIER, L. CEURVORST, F. BARBATO, N. OZAKI, N. KAMIMURA et al.

Des super-Terres en laboratoire.....16

F. SOUBIRAN, A. RAVASIO

Premier test en vue pour la production d'un faisceau gamma
de densité extrême.....18

X. DAVOINE, L. GREMILLET, A. SAMPATH, M. TAMBURINI, S. CORDE, M. GILLIOHANN

Première mesure de la puissance électromagnétique
des superéclairs.....20

J.-F. RIPOLL, T. FARGES, D. M. MALASPINA, G. S. CUNNINGHAM, E. H. LAY, G. B. HOSPODARSKY, S. PEDEBOY

PHYSIQUE NUCLÉAIRE 22

Vers la découverte d'une nouvelle radioactivité.....22

J.-P. EBRAN, E. KHAN

Lumière sur un noyau d'atome chamboulé par un neutron.....24

M. DUPUIS, M. KERVENO, T. KAWANO

PHYSIQUE DE LA MATIÈRE CONDENSÉE 26

Jupiter : une planète géante recrée en laboratoire.....26

S. BRYGOO, P. LOUBEYRE, M. MILLOT, P. CELLIERS, J. EGGERT, J. R. RYGG, G. COLLINS, R. JEANLOZ

MATÉRIAUX, PHYSIQUE DU SOLIDE 28

Les petits débris, un gros coup de pouce pour dévier
les astéroïdes.....28

B. JODAR, D. HÉBERT, B. AUBERT, J.-L. RULLIER, I. BERTRON, E. ANDO

Des films minces intelligents pour isoler du froid et de la chaleur.....30

J.-L. VICTOR, C. MARCEL, L. SAUQUES, N. PENIN, A. ROUGIER

OPTIQUE ET OPTRONIQUE 32

Des ondes térahertz pour détecter des explosifs à distance.....32

A. STATHOPOULOS, L. BERGE, S. SKUPIN

INSTRUMENTATION, MÉTROLOGIE ET CONTRÔLE 34

Un nouvel outil pour explorer la matière ultracomprimée par laser.....34

A. DENEUD, S. BRYGOO, A. SOLLIER, L. VIDEAU, A. BENUZZI-MOUNAIX, T. VINCI, A. RAVASIO, A. BERLIOUX, J. HOUY, J.-A. HERNANDEZ, E. BRAMBRINK

ÉLECTROMAGNÉTISME ET GÉNIE ÉLECTRIQUE 36

Un plasma pour une antenne miniature et agile en fréquence.....36

A. LAFFONT, J.-P. ADAM, O. PASCAL, R. PASCAUD

SCIENCE DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT 38

Où est passé le sous-marin argentin disparu
dans l'Atlantique Sud ?.....38

J. VERGOZ, Y. CANO, P. GAILLARD

Portrait-robot d'un séisme français.....40

A. VALLAGE, L. BOLLINGER, J. CHAMPENOIS, C. DUVERGER, A. GUILHEM TRILLA, B. HERNANDEZ, A. LE PICHON, C. LISTOWSKI, G. MAZET-ROUX, M. MÉNAGER, B. PINEL-PUYSSÉGUR, J. VERGOZ

Quand le chant des vagues évoque l'atmosphère.....42

A. LE PICHON, C. LISTOWSKI, M. DE CARLO

Une cartographie hélico presto pour mesurer la radioactivité.....44

J. AMESTOY, P. RICHON, A. DELPUECH, P. CHOTARD, P.-Y. MESLIN, H. RAYNAL, S. DERRIEN, É. PIQUE, D. BARATOUX

CHIMIE 46

Une couche carbonée pour ralentir l'oxydation du plutonium.....46

L. JOLLY, N. FAVART, B. RAVAT, B. OUDOT, I. POPA, S. CHEVALIER

La pression pour améliorer le stockage d'hydrogène ?.....48

A. MARIZY, G. GENESTE, P. LOUBEYRE

Vers une connaissance approfondie
des mécanismes microscopiques d'amorçage d'un explosif.....50

D. MATHIEU

MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE SCIENTIFIQUE, LOGICIEL 52

À la poursuite des cratères sur les optiques du Laser Mégajoule.....52

G. HALLO, C. LACOMBE, J. NEAUPORT, L. LAMAIGNÈRE, F. HILD

2021, rendre l'avenir possible

En 1996, l'ouverture à la signature du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Tice) marquait un tournant majeur dans l'histoire de la dissuasion nucléaire mondiale. En 2021, la célébration du vingt-cinquième anniversaire de cet événement a été l'occasion de rappeler que la France a été la première nation à signer ce traité, puis la première à le ratifier en 1998. Dans le même temps, elle démantelait son Centre d'essais du Pacifique, démontrant sans ambiguïté son renoncement définitif à valider la performance de ses armements nucléaires par des essais. Ces choix forts demeurent à ce jour sans équivalent, faisant de la France la seule puissance au monde à fonder la crédibilité de sa dissuasion sur une démarche de simulation numérique.

Cette mission d'exception a été confiée à la Direction des applications militaires (DAM) du CEA, où fut lancé dès 1996 le programme Simulation. Mettant en œuvre une démarche scientifique complète, alliant expériences élémentaires, modélisation physique et calcul intensif, ce programme a d'abord permis de garantir l'énergie délivrée par les têtes nucléaires des forces de dissuasion françaises, avant d'être étendu à toutes les performances de ces objets. Aujourd'hui, les démarches dites de garantie par la simulation se sont généralisées au sein du CEA – DAM, et l'association optimale d'évaluations par le calcul et d'essais dédiés à la mise au point de ces calculs et à leur validation est la règle.

Pour atteindre un tel niveau de complémentarité, le CEA – DAM a réussi à faire d'une contrainte – l'arrêt des essais – une opportunité. En fédérant ses équipes autour d'un objectif commun, elle a rapproché ingénieurs et techniciens, concepteurs et expérimentateurs, scientifiques et responsables projet. La recherche y est aujourd'hui par essence une recherche à double impact. La prévalence des programmes se traduit par un flot continu de nouveaux défis à relever pour les ingénieurs-chercheurs, tandis que leur créativité nourrit les grandes orientations programmatiques. Le couplage entre science et missions confiées par l'État est aujourd'hui si étroit qu'on chercherait en vain à distinguer à la DAM recherche et innovation.

Il est bon de garder cette spécificité à l'esprit au moment de feuilleter ce nouveau numéro de la revue *Avancées*. La sélection d'articles qui y est présentée ne constitue qu'un faible échantillon des centaines d'articles publiés en 2021 dans des revues à comité de lecture, cette production scientifique remarquable n'étant elle-même que la partie émergée de l'activité des chercheurs de la DAM. Elle est le signe clair que le respect des jalons de court terme ne se fait pas au détriment des travaux de plus longue haleine. Maîtriser les phénomènes physiques et leur modélisation, ou s'approprier de nouvelles

techniques et œuvrer à leur perfectionnement, tout cela permet de se préparer à répondre aux besoins à venir des autorités publiques. La phrase d'Antoine de Saint-Exupéry prend ici tout son sens : « Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible. »

À ce titre, les travaux en cours dans le domaine des armes nucléaires sont tout à fait emblématiques. En 2021, les Standards de calcul, qui sont la pierre angulaire des démarches de garantie par la simulation, ont été déposés par les différentes équipes de concepteurs en vue de leur homologation en 2022. Mais dans le même temps, de nouveaux moyens d'étude étaient mis en service ou renouvelés en vue des versions ultérieures de ces Standards. Prenons l'exemple de la caractérisation des matériaux. Le centre de Gramat a mis en service en 2021 un nouveau moyen de compression isentropique, Gepi-2 pour Générateur électrique de pression intense de deuxième génération. Capable de délivrer une impulsion de courant de six millions d'ampères en un millionième de seconde, il permettra l'étude de matériaux soumis à des conditions de pression ou de vitesse de déformation extrême. Dans le même temps, pour atteindre d'autres

« Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible. »

Antoine de Saint-Exupéry

régions du diagramme thermodynamique, le centre DAM Île-de-France remettait en service une enceinte à plasma pulsé. Elle permettra d'étudier la matière dite dense et tiède, par exemple l'aluminium dans la région de transition liquide-vapeur. Enfin, pour atteindre des densités et des températures encore plus élevées, la montée en puissance du Laser Mégajoule (LMJ) se poursuit sur le site du Cesta, en Aquitaine. Difficile de croire qu'au lancement du programme Simulation, il y a vingt-cinq ans, ce moyen n'était encore qu'un projet ! En 2021, plus de la moitié des 176 faisceaux qui l'équiperont à terme sont montés et en font déjà une installation exceptionnelle. Le succès de son ouverture à la communauté académique en témoigne. À l'avenir, ces nouvelles capacités propres s'ajouteront à celles déjà offertes par nos collaborations car, dès que la crise sanitaire l'a permis, et toujours pour s'en tenir au seul thème de la caractérisation des matériaux, les équipes de la DAM ont repris leurs déplacements réguliers sur les grands moyens de recherche nationaux (Luli, Soleil), européens (ESRF, GSI) ou internationaux (NIF).

Du côté des supercalculateurs, le développement des performances est tout aussi spectaculaire. Certes, la puissance de calcul n'était pas nulle à la DAM en 1996, mais elle a été multipliée par 500 000 en vingt-cinq ans. La dernière machine issue de la collaboration avec Atos est le supercalculateur Exa 1, dont la première partition a été mise en service fin 2021. Avec une puissance crête de 37 pétaflops, c'est-à-dire 37 millions de milliards d'opérations par seconde, et une puissance effective constatée dès sa mise en service de 23 pétaflops, il se place 14^e dans le classement des 500 ordinateurs les plus puissants au monde. Avec un tel outil, les équipes de tous les centres de la DAM peuvent sereinement s'attaquer aux multiples défis de simulation des prochaines années.

Car, moyens d'essais ou moyens de calcul, il me semble capital de souligner ici que rien ne serait possible sans l'engagement des techniciens et des ingénieurs-chercheurs de la DAM. Ce sont eux qui, patiemment, conçoivent une expérience – réelle ou virtuelle –, la réalisent et enfin l'exploitent. Aussi souvent que possible, ils réalisent ce travail en lien étroit avec la communauté académique et savent associer des étudiants à ces programmes passionnants. La DAM a ainsi accueilli 150 doctorants et 30 postdoctorants en 2021, auxquels se sont ajoutés 150 stagiaires et 250 apprentis. Ces centaines d'étudiants peuvent témoigner que la dimension humaine et l'esprit d'équipe sont aussi les clés du succès du travail de recherche et développement à la DAM.

Investissement dans la durée, modélisation physique au meilleur niveau, caractérisation des matériaux en conditions extrêmes, esprit d'équipe, il m'a semblé assez logique de conclure cet édito en saluant le travail remarquable de Paul Loubeyre. Spécialiste de la matière condensée mondialement connu, responsable de multiples campagnes d'expérience sur les plus grandes installations de recherche, synchrotrons et lasers de puissance, ce chercheur hors pair a su allier maîtrise de la théorie la plus pointue et perfectionnement de la technologie la plus originale – celle des cellules dites à enclumes de diamant – pour obtenir des résultats sans équivalent. Au risque d'être réducteur, je me contenterai de rappeler que, dans la quête de l'hydrogène métallique, c'est Paul Loubeyre avec son équipe du centre DAM Île-de-France qui a décroché le Graal en 2019. Pour l'ensemble de ses travaux, il a reçu le 23 novembre 2021 le grand prix Lazare-Carnot de l'Académie des sciences. Cette récompense méritée honore le CEA – DAM tout entier. Elle l'oblige aussi, et la préparation de l'avenir y sera toujours une priorité.



Olivier VACUS

Directeur scientifique du CEA – DAM

vie scientifique

Faits marquants de l'année 2021

Campagne expérimentale Smart sur le Laser Mégajoule

La campagne expérimentale Smart, permettant d'étudier la propagation d'une onde radiative dans un tube, s'est déroulée du 9 au 23 mars 2021 sur le Laser Mégajoule (LMJ). La maîtrise d'œuvre expérimentale a été assurée par le centre DAM Île-de-France, de même que la conception de la cible et l'évaluation de son fonctionnement par simulation numérique. La cible fabriquée au centre de Valduc était composée de deux cavités chauffées chacune par 24 faisceaux laser. Le rayonnement X produit par l'interaction laser-matière dans chaque cavité se propageait ensuite dans un tube central rempli d'une mousse permettant d'atteindre différents régimes de propagation.

Topaze, nouveau calculateur du CCRT

Depuis le 23 juin 2021, le Centre de calcul recherche et technologie (CCRT), de la technopole Teratech située sur le site DAM Île-de-France, accueille un nouveau supercalculateur dénommé Topaze pour relever les défis du calcul haute performance et du traitement de données. Topaze fait partie de la gamme de supercalculateurs HPC d'Atos, issus de la R&D menée conjointement par Atos et le CEA – DAM. Il dispose d'une puissance de calcul crête de 8,8 pétaflops (millions de milliards d'opérations par seconde).

Mesure de la réaction $^{239}\text{Pu}(n,2n)^{238}\text{Pu}$

Une nouvelle mesure de la section efficace de la réaction $^{239}\text{Pu}(n,2n)^{238}\text{Pu}$ a été publiée le 18 mai 2021 dans la revue scientifique *Physical Review C*. Réalisée juste au-dessus du seuil de la réaction sur l'accélérateur Nenuphar du centre DAM Île-de-France, elle utilise une méthode originale développée par une équipe du même centre. Elle a permis d'obtenir des valeurs indépendantes des modèles, précieuses pour le programme Simulation.

Exa 1 classé 14^e au TOP500

Conçu en collaboration avec Atos-Bull, le supercalculateur mis en service fin 2021 au CEA – DAM a été classé 14^e au TOP500, avec des performances de 23 pétaflops soutenus et 37 pétaflops crête. Contrairement aux machines occupant les premières places de ce classement, cette première partition d'Exa 1 est dépourvue d'accélérateurs de calcul de type GPU (*Graphic Processing Unit*), ce qui en fait la machine non accélérée la plus puissante en Europe et la 4^e au monde.

Un nouveau détecteur pour le réseau de surveillance de l'Otice

Le 14 juillet 2021, l'Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Otice) a officialisé la qualification du Spalax-Nouvelle génération (Système de Prélèvement et d'Analyse en Ligne Automatisée du Xénon) pour un déploiement au sein du réseau de stations du Système de surveillance international (SSI), un des outils de vérification du Tice. Cet équipement est conçu pour détecter dans l'atmosphère, à l'échelle de traces, le xénon radioactif libéré à la suite d'un éventuel essai nucléaire souterrain.

Prix et distinctions reçus en 2021

Grand prix Lazare-Carnot

Le grand prix Lazare-Carnot de l'Académie des sciences a été décerné à **Paul LOUBEYRE**, du centre DAM Île-de-France, qui étudie la matière sous très hautes pressions en couplant une presse à enclumes de diamant à de grands instruments, synchrotrons et lasers de puissance. Plusieurs développements expérimentaux l'ont conduit à battre des records de pression, à améliorer la finesse des mesures et à révéler des comportements remarquables de la matière en conditions extrêmes. Il a mesuré les équations d'état de plusieurs matériaux avec une application directe pour la modélisation des intérieurs planétaires ou pour le programme Simulation du CEA – DAM. Il est reconnu pour ses travaux sur l'hydrogène, dont la récente observation de l'hydrogène métallique.

Légion d'honneur

Élisabeth BLANC, du centre DAM Île-de-France, s'est vu remettre l'insigne de la Légion d'honneur à Collioure par Catherine CESARSKY, astrophysicienne, membre de l'Académie des sciences, ancien haut-commissaire à l'énergie atomique du CEA et grand officier de l'ordre de la Légion d'honneur. Cette décoration témoigne de l'engagement d'Élisabeth BLANC dans l'effort national et international pour la recherche en physique de l'atmosphère et consacre ainsi toute une carrière d'excellence au sein du CEA – DAM.

Prix à la conférence Science and Technology à l'Otice

Lors de la conférence Science and Technology organisée à Vienne par l'Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Otice), **Julien VERGOZ**, du centre DAM Île-de-France, a présenté les travaux réalisés au centre national de données français sur la caractérisation à partir des données infrasonores de l'explosion au port de Beyrouth le 4 août 2020. Les analyses de données, complétées par des simulations des formes d'ondes, lui ont valu le prix du meilleur poster.

Prix de thèse d'école doctorale

Gabriela HERRERO-SABOYA, ancienne doctorante au centre DAM Île-de-France, a obtenu le prix de thèse de l'école doctorale Génie électrique, électronique, télécommunications et santé (GEETS) de l'université Paul-Sabatier Toulouse III pour sa thèse intitulée *Les défauts dans le silicium : revisiter les modèles théoriques pour guider les calculs* ab initio, soutenue en novembre 2020.

Prix Jacques-Dalla-Torre

La Société française de métallurgie et de matériaux (SF2M) a décerné le prix Jacques-Dalla-Torre à **Thomas JARRIN**, doctorant au centre DAM Île-de-France. Ce prix récompense un jeune chercheur pour ses travaux dans le domaine de la modélisation de la formation et de l'évolution cinétique des microstructures des matériaux depuis l'échelle atomique jusqu'aux échelles supérieures.

Colloques organisés en 2021

10^e workshop international des développeurs du code Abinit

Le code Abinit est un code de calcul développé dans le cadre d'un projet collaboratif international dont le CEA - DAM est l'un des membres principaux. Il permet de calculer les propriétés des matériaux à l'échelle microscopique à l'aide de théories dites *ab initio*, c'est-à-dire construites à partir des premiers principes. Le CEA - DAM a organisé la dixième édition du 31 mai au 4 juin 2021. Soixante-quinze participants issus de la communauté internationale se sont retrouvés pour écouter des présentations scientifiques et techniques.

Séminaire annuel Tsunamis

Le séminaire Tsunamis organisé annuellement par le centre CEA - DAM Île-de-France s'est tenu le 30 septembre 2021 au Cenalt et a réuni une quinzaine de chercheurs de la communauté. Outre les présentations des activités opérationnelles

(Cenalt et LDG/Pamatai) et des activités internes au CEA - DAM, les intervenants du CEA - DAM et des organismes invités (ESTP, université de Pau et des pays de l'Adour, université de Montpellier, Universidad de Málaga, Northwestern University) ont montré leurs travaux récents, en particulier sur la simulation numérique haute performance, les expériences de laboratoire, les méthodes de prévision rapide faisant appel aux techniques d'apprentissage.

European Symposium on Laminar-Turbulent Transition in Hypersonic Regime

Dans le contexte de la simulation étendue des têtes nucléaires, le centre CEA - DAM du Cesta a mis à profit sa présidence de l'association d'organismes industriels, de recherche et d'enseignement d'HyFAR-Ara (Hypersonic Flight & Atmospheric Re-entry), pour organiser les 25 et 26 mai 2021, en collaboration avec l'Inria, Ariane Group, Onera et VKI, l'European Symposium on Laminar-Turbulent Transition in Hypersonic Regime. L'événement a attiré plus de 80 participants français, européens et américains (Nasa, Purdue University, University of Tennessee). Un état de l'art de la discipline a été présenté sous plusieurs aspects : modélisation, simulation numérique, essais au sol et en vol, conception.

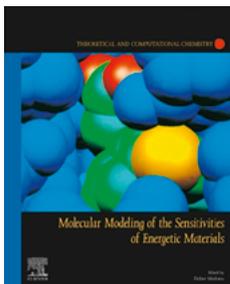
Séminaire Hera

L'aérodynamique hypersonique des écoulements raréfiés est un thème important pour la maîtrise et la simulation à haute altitude des rentrées atmosphériques, aux limites du domaine de validité de la mécanique des milieux continus. Ce thème a fait l'objet du séminaire Hera, pour Hypersonique des Écoulements Raréfiés, organisé par l'Onera et le centre CEA - DAM du Cesta les 14 et 15 octobre 2021 au centre Onera du Fauga-Mauzac, et qui a rassemblé une quarantaine de chercheurs spécialistes de ce domaine, aussi bien sur les aspects modélisation et simulation qu'expérimentation.

Workshop Accélération d'ions

Un workshop sur l'accélération d'ions à partir d'un jet de gaz mis en forme par des impulsions laser de durée nanoseconde s'est tenu les 15 et 16 septembre 2021 à Bordeaux avec le soutien du groupement de recherche Appel. Venant des centres CEA - DAM du Cesta et DAM Île-de-France, du Centre d'études nucléaires de Bordeaux-Gradignan, du Centre lasers intenses et applications (Celia) et du Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (Luli), quinze physiciens théoriciens et expérimentateurs ont échangé sur les résultats des précédentes campagnes expérimentales menées sur les installations GSI-Phelix et Luli-Pico2000. Les discussions ont permis d'élaborer une stratégie concernant le plasma tailoring et de concevoir une prochaine campagne expérimentale.

Livres parus en 2021



Molecular modeling of the sensitivities of energetic materials

Didier MATHIEU (CEA - DAM, coordonné par)

Elsevier, 486 pages, ISBN 9780128229712.

La modélisation moléculaire de la sensibilité des matériaux énergétiques est essentielle pour la recherche de nouveaux composés performants et sûrs. L'ouvrage décrit les avancées récentes dans ce domaine, en particulier en ce qui concerne la sensibilité à l'impact. L'application des techniques récentes comme l'apprentissage automatique, les nouveaux modèles physiques, les nouvelles techniques de dynamique moléculaire ou encore les simulations multiéchelles est décrite.

Techniques de l'ingénieur -

Article « Graphites et composites C/C pour réacteurs nucléaires de 4^e génération »

Patrick DAVID (CEA - DAM), Lionel GOSMAIN

Rubrique Énergies, référence BN3741 v1.

Si le graphite a été utilisé comme matériau de structure et modérateur neutronique dès 1942, les matériaux C/C ont été identifiés plus récemment comme candidats pour différents composants des réacteurs de quatrième génération (barres de contrôle, conduits chauds, échangeurs de chaleur, etc.). Ils possèdent en effet des propriétés mécaniques et thermiques exceptionnelles. La diminution de leurs évolutions dimensionnelles sous irradiation reste le point clé pour le développement des barres de contrôle, principale application étudiée.

Nouveaux accords de partenariat en 2021

Convention de collaboration avec l'université de Cambridge

Depuis vingt ans, le G. K. Batchelor Laboratory de l'université de Cambridge a acquis une expertise de renommée mondiale dans l'expérimentation de l'instabilité de Rayleigh-Taylor (IRT), caractéristique du mélange hydrodynamique par gravité, et a la capacité de capturer les champs tridimensionnels de vitesse et concentration à haute résolution, donnant ainsi accès à la dynamique multiéchelle dans un cas réel, enjeu majeur pour la modélisation des mélanges turbulents. La convention de collaboration entre le centre CEA - DAM Île-de-France et l'université de Cambridge a pour objectifs l'identification expérimentale des grandes structures de cet écoulement et l'établissement d'une base de données expérimentales.

Création du LRC COSiMS

Le laboratoire de recherche conventionné (LRC) COSiMS, pour Conception, Optimisation et Simulation des Matériaux et Structures, a été créé en décembre 2021 pour une durée de cinq ans. Il rassemble des ingénieurs du centre CEA - DAM du Cesta et de l'Institut de mécanique et d'ingénierie de Bordeaux, sous tutelle de l'École nationale supérieure des arts et métiers, de l'université de Bordeaux, de l'Institut polytechnique de Bordeaux et du CNRS. Les principaux axes de recherche identifiés sont les suivants : étude et modélisation du comportement mécanique et thermomécanique des matériaux et des structures, étude et modélisation des phénomènes de transfert dans les matériaux et les structures, développement de modèles macroscopiques, réduits ou métamodèles, multiéchelles et multiphysiques adaptés à la conception et à l'optimisation des matériaux et des structures.

Création du LRC Sparte

Le laboratoire de recherche conventionné (LRC) Sparte, pour Susceptibilité Particulière Aux Rayonnements et Transitoires Électromagnétiques, a été créé sur la thématique de la susceptibilité des électroniques aux rayonnements électromagnétiques non ionisants. Il rassemble les laboratoires Xlim de l'université de Limoges, IMS (Intégration du matériau au système) de l'université de Bordeaux et l'Institut d'électronique et des systèmes (IES) de l'université de Montpellier autour du centre CEA - DAM de Gramat.

Création du LRC Prévi

Le laboratoire de recherche conventionné (LRC) Prévi, pour Pôle de Recherche et d'Études sur la Vulnérabilité des Infrastructures, qui existait préalablement sous la forme d'une structure fédérative de recherche, a été créé sur la thématique de la modélisation et la simulation du comportement des bétons, des géomatériaux et des structures en béton armé, face aux effets mécaniques des armes conventionnelles. Il rassemble, avec le centre CEA - DAM de Gramat, le laboratoire Sols, solides, structures, risques (3SR) à Grenoble, le Laboratoire de mécanique multiphysique et multiéchelle (LaMcube) à Lille et le Laboratoire de mécanique Paris-Saclay (LMPS).

Reconduction du LRC Sage

Le laboratoire de recherche conventionné (LRC) Science Appliquée au Génie Électrique (Sage) a été reconduit pour une durée de cinq ans. Dans sa configuration initiale, il regroupait le laboratoire Siame de l'université de Pau et des pays de l'Adour et les centres CEA - DAM de Gramat et du Cesta. Ce renouvellement voit arriver le centre de Valduc. Les recherches conduites dans ce cadre concernent l'optimisation et la fiabilisation des machines de hautes puissances pulsées (HPP), les commutateurs à état solide pour les HPP, le développement de briques technologiques pour les systèmes de forte puissance et la nouvelle thématique de fiabilisation des diodes à faisceau d'électrons.

Élargissement du LRC à l'Ircer

L'Institut de recherche sur les céramiques (Ircer) à Limoges est une unité mixte de recherche (UMR) qui rassemble l'université de Limoges et le CNRS. En 2002, le CEA - DAM avait établi avec cette UMR un laboratoire de recherche conventionné (LRC) sur la thématique de la projection thermique des matériaux. Ce partenariat s'est renforcé en avril 2021 avec un élargissement des domaines de coopérations scientifiques. Cinq nouvelles thématiques impliquant des équipes du centre CEA - DAM du Ripault ont été définies : matériaux céramiques oxynitrures par procédés spéciaux, design de céramiques conformées à gradient diélectrique, matériaux précéramiques et géopolymères pour composites thermostucturaux, modélisation des effets du frittage de structures céramiques alvéolaires définies numériquement et élaborées par fabrication additive et, enfin, développement de techniques expérimentales de tri de matériaux couplant sollicitations thermiques et diagnostics électromagnétiques (apport des compétences de l'Institut Xlim).

Accord de collaboration avec l'institut Xlim et l'Urca

La collaboration avec l'Institut Xlim de l'université de Limoges et avec l'Institut de thermique, mécanique et matériaux de l'université de Reims Champagne-Ardenne (Urca) vise à mettre au point et qualifier un moyen de mesure des propriétés diélectriques des matériaux à haute température. L'Institut Xlim apporte ses compétences sur la conception et le choix des matériaux du dispositif de mesures d'hyperfréquences, et l'Urca est impliquée pour son expertise dans le domaine de la conception thermique et thermomécanique de l'enceinte thermique permettant de conditionner les matériaux caractérisés à haute température. Les experts en mesure d'hyperfréquences du CEA - DAM sont pleinement impliqués dans les orientations données aux travaux. Le moyen conçu, assemblé et qualifié au sein de ce projet sera ensuite mis en œuvre au centre du Ripault sur les matériaux développés spécifiquement pour les besoins du CEA - DAM.

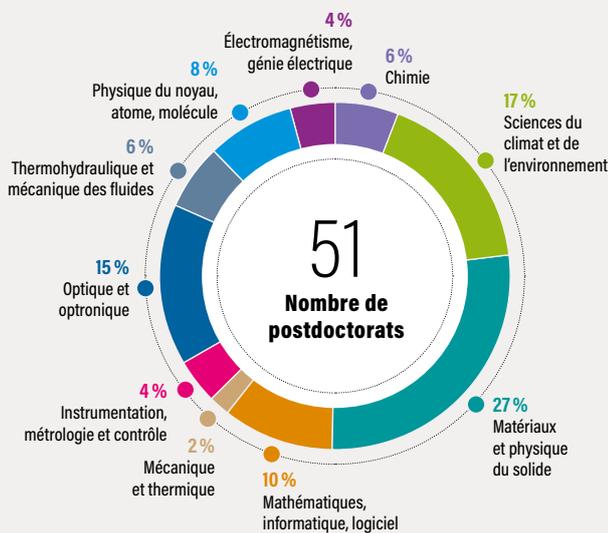
Participation du CEA - DAM au projet international Infra-AUV

Le CEA - DAM collabore depuis fin 2020, au sein du projet européen Infra-AUV (*Acoustics, Ultrasounds and Vibration*), avec cinq laboratoires nationaux de métrologie, dont le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) en France, et le Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) en Allemagne. Ce projet vise à repousser les limites actuelles de la métrologie acoustique et sismique dans les basses fréquences (en deçà de 0,1 Hz). Il traite du développement de nouveaux instruments, étalons et méthodes d'étalonnage, mis en œuvre depuis les laboratoires de métrologie, jusqu'aux sites de mesure en environnement non contrôlé, pour étalonner les capteurs géophysiques présents et suivre leur évolution. Pour le CEA - DAM, il s'agit de maintenir son expertise et son indépendance dans la conception et le développement, et la métrologie des chaînes de mesures géophysiques déployées sur ses réseaux de surveillance, et par conséquent d'améliorer la qualité des mesures acoustiques et sismiques disponibles afin d'accroître les performances des analyses et des expertises dans le cadre de ses missions.

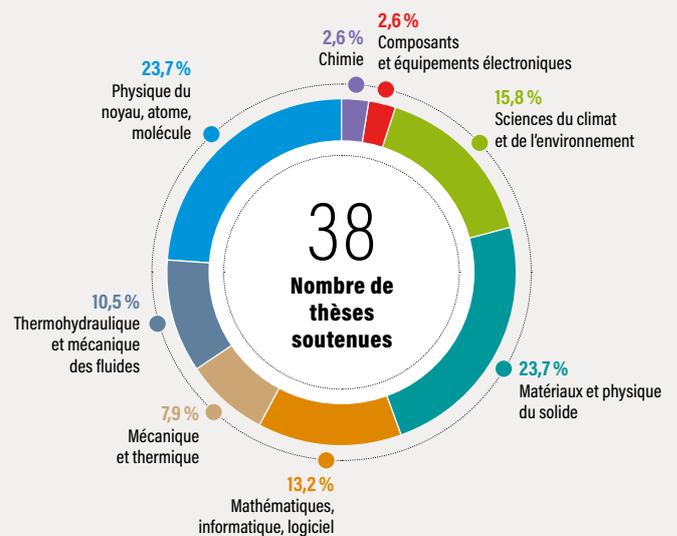
Thèses soutenues et en préparation - Postdoctorats

En 2021, 147 doctorants préparaient une thèse au CEA - DAM, soit dans un laboratoire d'un des cinq centres, soit dans un laboratoire partenaire avec le soutien financier du CEA - DAM ; 38 l'ont soutenue au cours de l'année. Par ailleurs, 51 docteurs étaient en contrat postdoctoral (voir listes des thèses soutenues et des postdoctorats).

Répartition des postdoctorats par domaine scientifique et technique



Répartition des thèses soutenues par domaine scientifique et technique



Publications scientifiques et techniques

En 2021, le CEA - DAM a publié 411 articles et comptes rendus de conférence dans des journaux à comité de lecture, ainsi que 29 comptes rendus de conférence dans un livre ou dans une série (ISI-Web of Science, 28/07/2022).

Habilitations à diriger les recherches (HDR)

Rachel NUTER

Centre du Cesta
Université de Bordeaux
Spécialité : physique des plasmas

Rémi MAISONNY

Centre de Gramat
Université de Caen Normandie
Spécialité : électrotechnique, radiographie éclair et hautes puissances pulsées

Yohan BARBARIN

Centre de Gramat
Université de Toulouse INPT
Spécialité : optique et optronique, vélocimétrie en détonique

Pascal THIBAudeau

Centre du Ripault
Sorbonne Université
Spécialité : matériaux modélisation simulation

Hervé PIOMBINI

Centre du Ripault
Université Paris-Saclay
Spécialité : laser

Jean-Christophe PAIN

Centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay
Spécialité : physique atomique

Emmanuel LABOURASSE

Centre DAM Île-de-France
Sorbonne Université
Spécialité : physique mathématique

Jean-Lin DEQUIEDT

Centre DAM Île-de-France
Université de Lorraine
Spécialité : physique du solide

Maxime BRIDOUX

Centre DAM Île-de-France
Université de Lorraine
Spécialité : biogéochimie organique

Pierre SOCHALA

Centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay
Spécialité : mathématiques appliquées

Thèses de doctorat soutenues en 2021

CHIMIE

Nathanaël CHAUSSOY, *Synthèse et caractérisation d'une résine ablative alternative*, université de Lyon.

COMPOSANTS ET ÉQUIPEMENTS ÉLECTRONIQUES

Thomas JARRIN, *Modélisation des effets de déplacements atomiques induits par irradiation dans les matériaux pour la microélectronique*, université Paul-Sabatier Toulouse III.

SCIENCES DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT

Mathieu GARNUNG, *Modélisation numérique haute performance des streamers de sprites : développement de diagnostics optiques et électromagnétiques pour caractériser les événements lumineux transitoires pour la mission spatiale TARANIS*, université d'Orléans.

Julien AMESTOY, *Étude de l'influence des facteurs environnementaux sur la spectrométrie gamma aéroportée et application à la surveillance environnementale de sites*, université Paul-Sabatier Toulouse III.

Alexandre GOUPY, *Apport de métamodèles multi-échelles à la caractérisation de la propagation acoustique*, ENS Paris-Saclay.

Alexandre PARIS, *Comparaison de modèles de tsunamis générés par glissements de terrain et exploration des champs d'application*, université de Pau et des pays de l'Adour.

Louise CORDRIE, *Modélisation de tsunamis historiques dans les Petites Antilles et validation des méthodes d'estimation de l'aléa tsunami*, université de Paris.

Grégoire HELLER, *Vers une meilleure estimation de la magnitude à partir de la coda sismique*, université Paul-Sabatier Toulouse III.

MATÉRIAUX, PHYSIQUE DU SOLIDE

Vincent JAULIN, *Étude et modélisation d'impacts hautes et basses vitesses sur des matériaux et structures de satellites*, université de Nantes.

David PALMA DE BARROS, *Diffraction X in situ sous sollicitation dynamique : caractérisation cristallographique des transformations polymorphiques de l'étain*, université de Poitiers.

Béangère ÉVIN, *Caractérisations et modélisation du vieillissement des tritiums métalliques, application au tritium de palladium*, université Paris-Est.

Joharimanitra RANDRIANANDRAINA, *Mécanismes radiolytiques de production et recombinaison d'hydrogène dans un système eau tritiée adsorbée sur zéolithes*, université de Bourgogne-Franche-Comté.

Julien PINOT, *Compréhension des phénomènes physico-chimiques régissant la croissance des mousses métalliques obtenues par plasma électrolytique : application à la fabrication de cible laser*, université de Bourgogne-Franche-Comté.

Marie DARCHEVILLE, *Synthesis of iron oxide nanoparticles and development of magnetic coatings by fluid processing*, université Paris-Saclay.

Vincent FOURNIER, *Isolants par projection plasma. Développement et caractérisation thermomécanique de revêtements autoportés épais*, université de Limoges.

Julien MARCHAND, *Revêtements antireflets innovants pour lasers de puissance*, université de Tours.

François RABETTE, *Prédiction de la microfissuration par champ de phase et méthode FFT pour les matériaux énergétiques comprimés*, université Paris Sciences et Lettres.

MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE SCIENTIFIQUE, LOGICIEL

Christina PAULIN, *Schémas numériques améliorés pour l'advection scalaire, monotone et conservative : réduction d'empreinte de maillage et de mouillage numérique*, université Paris-Saclay.

Éric HEULHARD DE MONTIGNY, *Cohérence thermodynamique et raideur dans les écoulements multifluides*, université Paris-Saclay.

Nestor DEMEURE, *Managing the compromise between performance and accuracy in simulation codes*, université Paris-Saclay.

Georges-Axel JAOYLAN, *A semantic approach to low-level software security*, université Paris Sciences et Lettres.

Ronan RIALLAND, *Téledétection hyperspectrale pour l'identification et la caractérisation de minéraux industriels*, université Paris-Saclay.

MÉCANIQUE ET THERMIQUE

Élodie KAHESHAMMER, *Étude expérimentale et numérique de la sensibilité de composites énergétiques : influence de la microstructure et rôle de l'endommagement*, université de Paris Sciences et Lettres.

Marie DABOS, *Équation d'état thermodynamique des produits issus de déflagrations gazeuses et de détonations en milieu condensé en présence d'aluminium*, université Paris-Nanterre.

Jules BATON, *Simulation en champ moyen de la restauration et de la recristallisation du tantale pur après déformation à froid*, université Paris Sciences et Lettres.

PHYSIQUE DU NOYAU, ATOME, MOLÉCULE, PLASMAS

Léo ESNAULT, *Production de photons gamma lors de l'interaction laser-matière et création de paires électron-positron par collision de photons*, université de Bordeaux.

Adrien PINEAU, *Modélisation de la formation d'un plasma par laser dans le contexte de la fusion par confinement inertiel*, université de Bordeaux.

Jean-Baptiste CHARRAUD, *Études de superhydrures par recherche aléatoire de structures couplée au calcul ab initio et accélérée par machine learning*, université Paris-Saclay.

Lysandra BATAIL, *Étude des modes de respirations nucléaires dans le formalisme QRPA : un défi pour les interactions effectives modernes*, université Claude-Bernard Lyon 1.

Mikael FROSINI, *Ab initio description of doubly-open shell nuclei via a novel resolution method of the quantum many-body problem*, université Paris-Saclay.

Kilian FRABOULET, *Approches de type intégrale de chemin pour l'étude de systèmes quantiques à N corps fortement corrélés*, université Paris-Saclay.

Yann BEAUJEAULT-TAUDIÈRE, *Étude des excitations multipolaires dans les noyaux froids et chauds, déformés et superfluides via la méthode des amplitudes finies*, université Paris-Saclay.

Marine SCIUS-BERTRAND, *Endommagements maîtrisés par chocs laser symétriques et désassemblage des collages*, Hesam Université.

Manuel JULLIEN, *Analyse spectroscopique et simulation numérique d'une expérience de plasma de néon photoionisé*, université Paris-Saclay.

THERMOHYDRAULIQUE ET MÉCANIQUE DES FLUIDES

Florian DANVIN, *Modélisation de la transition à la turbulence en régime hypersonique*, université libre de Bruxelles.

Matthieu LUGRIN, *Étude de l'interaction visqueuse avec décollement en régime hypersonique*, Institut polytechnique de Paris.

Yann MARCHENAY, *Modélisation de la turbulence en présence de rugosité et de soufflage en régime hypersonique*, université de Toulouse.

Jean-Cédric CHKAIR, *Mélanges turbulents compressibles en présence d'un fort rayonnement*, université de Paris.

38

Nombre de thèses de doctorat soutenues en 2021.

Postdoctorats en cours en 2021

CHIMIE

Camille MÉHAUT, Comportement en entreposage de produits contenant des actinides : étude des dégagements gazeux, Valduc.

Loïc HABERT, Synthèse de composés énergétiques et mesure de leurs propriétés thermiques, Le Ripault.

Gabriel GAIFFE, Caractérisation de polluants organonitrés dans les sols et les aquifères, DAM Île-de-France.

SCIENCES DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT

Jérôme AUBRY, Réponse d'instabilités gravitaires à des sollicitations statiques et dynamiques. Application à la zone Nord de l'atoll de Mururoa, DAM Île-de-France.

Samuel KRISTOFFERSEN, Amélioration des stratégies de déploiement par calibration sur site traçable des capteurs infrason, DAM Île-de-France.

Khadija MEGUE, Fouille de données : indexation de signaux et recherche rapide de doublets, DAM Île-de-France.

Benoît DERODE, Machine (deep) learning appliqué à la détection et à la caractérisation d'événements sismiques, DAM Île-de-France.

Codor KHODR, Plateforme de simulation numérique à usage applicatif du LRC Letma, DAM Île-de-France.

Sylvain MICHEL, Évaluation de l'aléa sismique probabiliste par failles avec application à la France métropolitaine, DAM Île-de-France.

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

Viviane SOUTY, Développement d'une approche probabiliste pour les tsunamis d'origine sismique le long des côtes méditerranéennes françaises, DAM Île-de-France.

MATÉRIAUX, PHYSIQUE DU SOLIDE

Julien MONNIER, Études expérimentale et numérique du vieillissement thermique de l'alliage inoxydable austénitique 316B, Valduc.

Damien BRAULT, Dispositif piézoélectrique sans plomb de récupération d'énergie, Le Ripault.

Clémentine BIDAUD, Développement et optimisation de matériaux fibreux pour l'isolation haute température, Le Ripault.

Julien DRIEU LA ROCHELLE, Caractérisations microstructurales de composites à renfort carbone, Le Ripault.

Louise SEVIN, Élaboration et étude de céramiques monolithiques multiphasées, Le Ripault.

Félix BUNEL, Élaboration par impression 3D et étude de composites à matrice céramique, Le Ripault.

Lorie DAVID, Élaboration et caractérisation de composites carbone-résine à l'état vierge et pyrolysé, Le Ripault.

Ferdous BEN ROMDHANE, Étude de la carbonisation de fibres de carbone, Le Ripault.

Béatrice PLUJAT, Étude de l'élaboration de composites C/SiC, Le Ripault.

Johann COLAS, Étude du comportement thermomécanique des composites C/SiC, Le Ripault.

Loïc TORAILLE, Mesures sous haute pression et haute température de magnétométrie par centre NV et de spectroscopie Raman, DAM Île-de-France.

Cintia HARTMANN, Modélisation multiéchelle des électrodes de piles à combustibles et électrolyseurs à oxyde solide, DAM Île-de-France.

Faoulat MIRADJI, Étude théorique d'explosifs binaires nanostructurés cœur/coquille par dynamique, DAM Île-de-France.

Mouad RAMIL, Caractérisation des cinétiques de transition de phase dynamique moléculaire, DAM Île-de-France.

Alexis FORESTIER, Construction d'un banc de diffusion Brillouin sous chauffage laser pour la mesure de l'équation d'état des produits de détonation. Mesure de vitesse du son dans des fluides moléculaires simple (H_2O , N_2 , CO_2), DAM Île-de-France.

MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE SCIENTIFIQUE, LOGICIEL

Mikolaj Adam KOWALSKI*, Simulation du transport de particules dans des géométries stochastiques hétérogènes, DAM Île-de-France.

Matthieu ANCELLIN, Algorithmes de reconstruction d'interface par apprentissage automatique pour des simulations hydrodynamiques, DAM Île-de-France.

Anthony LAYBROS, Étude par imagerie satellitaire des panaches d'eau émis par les aéroréfrigérants des centrales nucléaires, DAM Île-de-France.

Mouhcine MENDIL, Apprentissage profond pour la modélisation de la pollution de l'air, DAM Île-de-France.

Victor WATSON, Caractérisation probabiliste bayésienne en temps réel de sources de rejets nocifs en environnement industriel ou urbain, DAM Île-de-France.

MÉCANIQUE ET THERMIQUE

Eileen BOISSIN, Optimisation de structures auto-amortissantes élaborées par fabrication additive, Cesta.

OPTIQUE ET OPTRONIQUE

Arthur LE CAMUS, Endommagement des composants optiques sur chaîne Petal, Cesta.

Manon LAMY, Simulation d'un amplificateur laser 1 J à 10 Hz, Cesta.

Thomas HAMOUNDI, Étude d'un amplificateur laser 1 J à 10 Hz, Cesta.

Nicolas VALERO, Développement d'un système amplificateur paramétrique optique d'impulsions de dérive en fréquence (OPCPA) pour l'injection d'une chaîne laser de puissance, Cesta.

Hugo CHESNEAU, Effet thermique dans l'air dans un module de pompage diode multidisques, Cesta.

Jean-François LUPI, Qualification et optimisation d'un ampli laser refroidi par liquide, Cesta.

Lucien LEHMANN, Modélisation du comportement de défauts critiques dans les composants laser, Cesta.

INSTRUMENTATION, MÉTROLOGIE ET CONTRÔLE

Romain KARCHER, Développement d'un étalon de type réfractomètre laser compact, pour la métrologie absolue de la pression dynamique dans la bande de fréquence 0,001 Hz-0,1 Hz associé au banc d'étalonnage des capteurs de pression dynamique infrason du CEA, DAM Île-de-France.

Anthony DER MESROBIAN-KABAKIAN, Optimisation d'un système de mesure ultra-compact à coïncidence électron/photon pour la détection et la caractérisation de radioisotopes du xénon, DAM Île-de-France.

THERMOHYDRAULIQUE ET MÉCANIQUE DES FLUIDES

Eduardo MARTINI, Étude et hiérarchisation des mécanismes de transition laminaire/turbulent sur parois courbes et rugueuses en régime supersonique, Cesta.

Damien TOUSSAINT, Modélisation et simulation numérique d'écoulements aérodynamiques en régime raréfié hypersonique, Cesta.

Vivien LORIDAN, Modélisation physico-numérique des écoulements hypersoniques hors équilibre chimique 3D, Cesta.

PHYSIQUE DU NOYAU, ATOME, MOLÉCULE, PLASMAS

Gabriel PEREZ-CALLEJO, Modélisation de plasmas magnétisés créés par laser, Cesta.

Étienne JAUPART, Des atomes aux planètes : simulation ab initio des transitions de phase dans les intérieurs planétaires, DAM Île-de-France.

Damien MINENNA, Modélisation de l'émission Raman stimulée, DAM Île-de-France.

Dorota GOTFRYD, Calcul des forces atomiques dans des systèmes corrélés, DAM Île-de-France.

Rodolphe COLLIN, Études numériques et analytiques pour l'optimisation des performances de lissage optique sur le Laser Mégajoule, DAM Île-de-France.

ÉLECTROMAGNÉTISME, GÉNIE ÉLECTRIQUE

Stéphane COUDERT, Maîtrise de l'impulsion électromagnétique générée par les expériences laser en régime pétawatt, Cesta.

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

* Postdoctorat rattaché à la Direction des énergies du CEA et cofinancé par la Direction des applications militaires.

D. Raffestin, D. Batani, J.-L. Dubois, J.-E. Ducret*, E. D’Humières, V. Tikhonchuk [Centre lasers intenses et applications (Celia), UMR 5107 CNRS – CEA – Université de Bordeaux]
L. Lecherbourg, P.-É. Masson-Laborde, X. Davoine, L. Gremillet [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire matière en conditions extrêmes (LMCE), Bruyères-le-Châtel]
I. Lantuéjoul, B. Vauzour, X. Vaisseau, A. Duval, C. Reverdin, B. Rosse, G. Boutoux, C. Rousseaux [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France]
N. Blanchot [CEA – DAM, centre du Cesta]
**aujourd’hui au Grand Accélérateur national d’ions lourds (Ganil) à Caen*

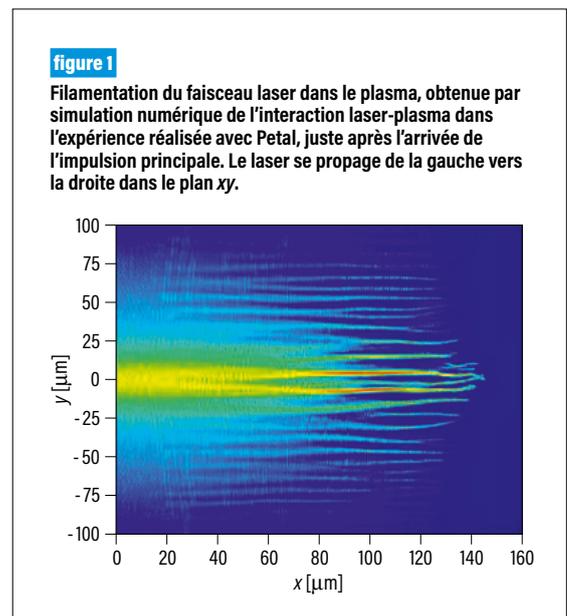
Petal : des protons super-énergétiques pour sonder la matière

Construit sur l’installation Laser Mégajoule du centre CEA – DAM du Cesta, près de Bordeaux, le laser Petal a récemment accéléré des protons à des énergies bien supérieures aux valeurs attendues **1**. Les physiciens ont interprété ces mesures grâce à des simulations numériques et ont démontré la fiabilité de leurs détecteurs, dont c’était la première utilisation. De tels faisceaux de protons permettront de radiographier des cibles extrêmement denses ou de mesurer des champs magnétiques.

La surprise a été de taille au sein de l’équipe associant le CEA – DAM et le Centre lasers intenses et applications (Celia), quand leurs détecteurs, mis en œuvre pour la première fois, ont mesuré des protons d’une énergie proche de 50 mégaelectronvolts (MeV), soit une vitesse égale au tiers de celle de la lumière. Ces protons super-énergétiques ont été produits en éclairant une cible avec le laser Petal, financé par la Commission européenne et la Région Nouvelle-Aquitaine et mis en œuvre par le CEA – DAM au profit d’expériences académiques. De classe pétawatt, ce laser délivre en un temps inférieur à la picoseconde (ps), soit un millième de milliardième de seconde, une énergie d’environ 1 kilojoule, soit l’équivalent de celle d’une balle de golf se déplaçant à 750 km/h. Cette énergie de proton constitue un record en comparaison des valeurs obtenues sur des installations similaires aux États-Unis (laser ARC) ou au Japon (laser LFEX).

Petal, un outil pour sonder la matière

Le faisceau de protons produit sur Petal est d’un grand intérêt, car capable de radiographier des plasmas denses analogues à ceux créés dans la fusion par confinement inertiel ou à ceux qui alimentent les réactions nucléaires à l’intérieur du Soleil. Cela concerne en particulier les plasmas engendrés par le Laser Mégajoule, avec lequel Petal est couplé et qui peut porter la matière dans des conditions extrêmes



– température de plusieurs dizaines de millions de degrés et masse volumique de plusieurs centaines de fois celle de la matière solide ordinaire. Par ailleurs, la sensibilité des protons à l’interaction électromagnétique leur permet de « visualiser » et quantifier la valeur des champs électromagnétiques qui règnent au sein des plasmas traversés (voir l’article p. 12-13).

Des protons super-énergétiques

Pour produire et accélérer des protons, Petal irradie une fine plaque de plastique (CH) revêtue d’une pellicule d’aluminium sur la face en regard du laser. L’éclairement laser est faible dans un premier temps – on parle de préimpulsion –, puis il augmente brutalement d’un million de fois dans un deuxième temps – on parle alors d’impulsion principale.

La préimpulsion vaporise la couche d’aluminium et les électrons provenant de l’ionisation de ses atomes sont fortement chauffés par le laser. Dès l’arrivée de l’impulsion principale, des phénomènes complexes mais connus provoquant la fragmentation du faisceau laser en filaments parallèles de lumière (**figure 1**) où la densité d’énergie électromagnétique, déjà très

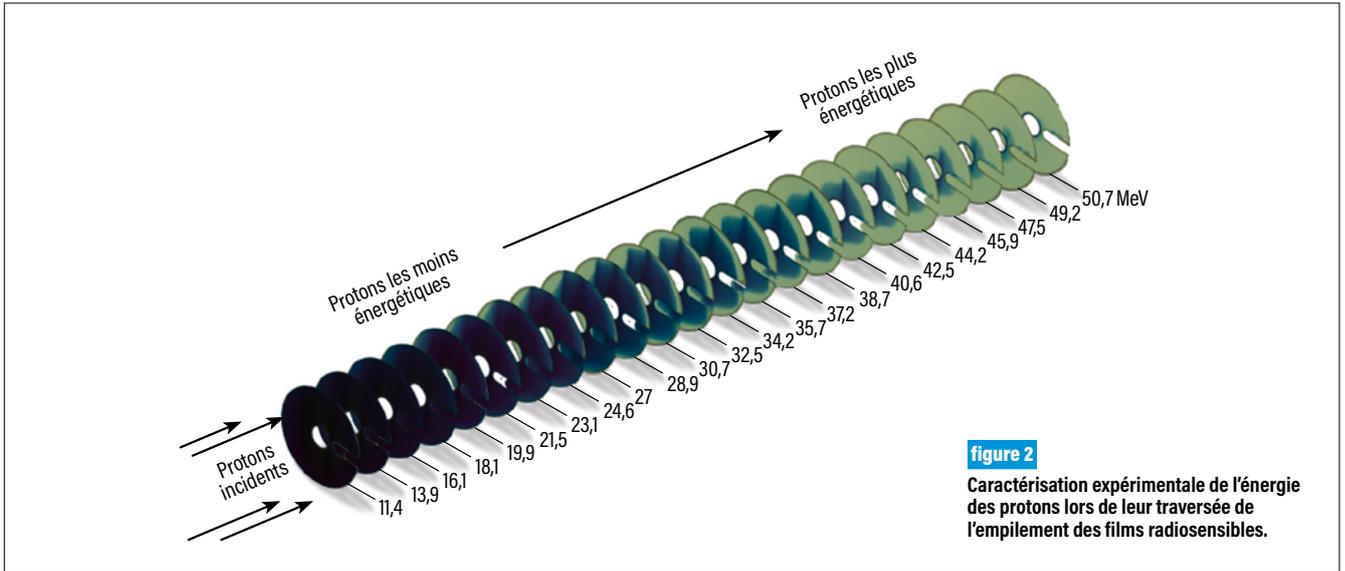


figure 2
Caractérisation expérimentale de l'énergie des protons lors de leur traversée de l'empilement des films radiosensibles.

élevée, augmente plus encore. Les électrons y sont alors accélérés jusqu'à des vitesses avoisinant celle de la lumière, associées à des énergies de plusieurs dizaines de mégaélectronvolts. À de telles énergies, ils traversent aisément la plaque de plastique et débouchent dans le vide, de l'autre côté de la plaque, où ils forment un nuage chargé négativement. Il en résulte un intense champ électrostatique qui confine les électrons au voisinage de la surface et arrache progressivement, les noyaux d'atomes d'hydrogène qui s'y trouvent, c'est-à-dire les protons.

Dans l'expérience avec le laser Petal, un ensemble de détecteurs et spectromètres dédiés [2](#) permet de caractériser

l'énergie des particules émises lors de l'interaction (rayons X, protons et électrons). Pour les protons, le diagnostic Sepage, pour Spectromètre Électron Proton à Grande Énergie, est composé d'un système de déflection, par l'action combinée de champs électrique et magnétique, et d'un empilement de films radiosensibles ([figure 2](#)) [3](#). La simulation numérique de l'expérience, réalisée à l'aide de codes spécifiques développés au CEA – DAM, a confirmé le scénario et restitué les énergies mesurées. [La figure 3](#) révèle une corrélation entre la position des protons et leur énergie : les plus rapides sont situés à l'avant de la distribution spatiale. Des énergies de plus de 40 MeV sont observées le long de l'axe

laser ($y = 0$), en bon accord avec les valeurs expérimentales.

La génération de protons aussi énergétiques suppose une vaporisation importante de la face de la cible éclairée par le laser et la préservation de l'intégrité de sa face opposée. Petal réunit les conditions adéquates à l'obtention de ce compromis délicat. Cette campagne de qualification a montré de façon éclatante que les moyens expérimentaux tout comme les outils de simulation sont non seulement d'ores et déjà opérationnels, mais aussi très performants. Cela ouvre des perspectives d'optimisation des sources de particules et de rayonnement pour la radiographie de cibles denses ou de champs électromagnétiques.

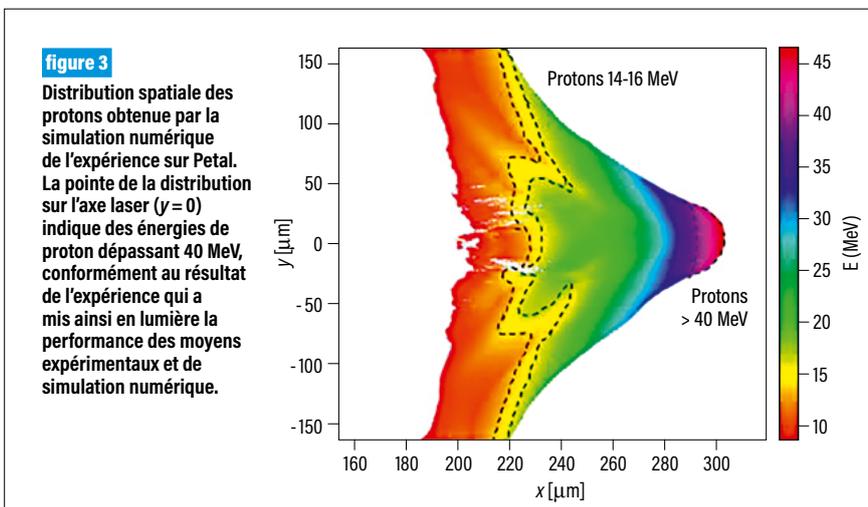


figure 3
Distribution spatiale des protons obtenue par la simulation numérique de l'expérience sur Petal. La pointe de la distribution sur l'axe laser ($y = 0$) indique des énergies de proton dépassant 40 MeV, conformément au résultat de l'expérience qui a mis ainsi en lumière la performance des moyens expérimentaux et de simulation numérique.

RÉFÉRENCES

- [1 D. Raffestin et al.](#), « Enhanced ion acceleration using the high-energy petawatt PETAL laser », *Matter Radiat. Extremes*, **6**, 056901 (2021).
- [2 J.-E. Ducret et al.](#), « The PETAL+ project: X-ray and charged particle diagnostics for plasma experiments at LMJ-PETAL », *Nucl. Instr. Meth. A*, **720**, p. 141-143 (2013).
- [3 A. Duval et al.](#), « Diagnostics PETAL+ : des instruments de mesure pour les expériences utilisant le laser PETAL », dans *Sources photoniques et de particules produites par laser, revue chocs*, **49**, p. 101-109 (2019).

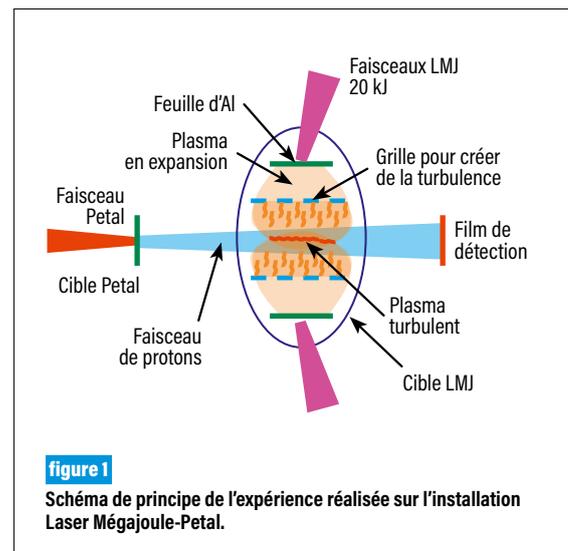
A. F. A. Bott, L. Chen, A. A. Schekochihin, G. Gregori [Université d'Oxford, Royaume-Uni]
A. Casner, T. Caillaud, L. Le Deroff [CEA - DAM, centre du Cesta]
G. Boutoux, A. Duval, I. Lantuéjoul, R. Rosch, B. Vauzour, B. Vilette [CEA - DAM, centre DAM Île-de-France]
D. Q. Lamb, P. Tzeferacos [Université de Chicago, Illinois, États-Unis]

Aux origines du champ magnétique interstellaire

L'essentiel de la matière visible dans l'Univers se trouve sous la forme d'un gaz ionisé, le plasma, où rayonnement, champ magnétique et mouvements turbulents jouent un rôle essentiel. Une question fondamentale pour l'astrophysique est de comprendre pourquoi la valeur du champ magnétique a été multipliée par cent mille milliards (quatorze ordres de grandeur) depuis le Big Bang. Un effet lié à la turbulence dans le milieu interstellaire est privilégié, reposant sur un mécanisme communément admis pour l'amplification du champ magnétique. Jusqu'à récemment, plusieurs défis s'opposaient au test expérimental de cette hypothèse dans des plasmas représentatifs. Une collaboration internationale vient de réaliser ce test sur l'installation Laser Mégajoule-Petal du CEA - DAM **1**.

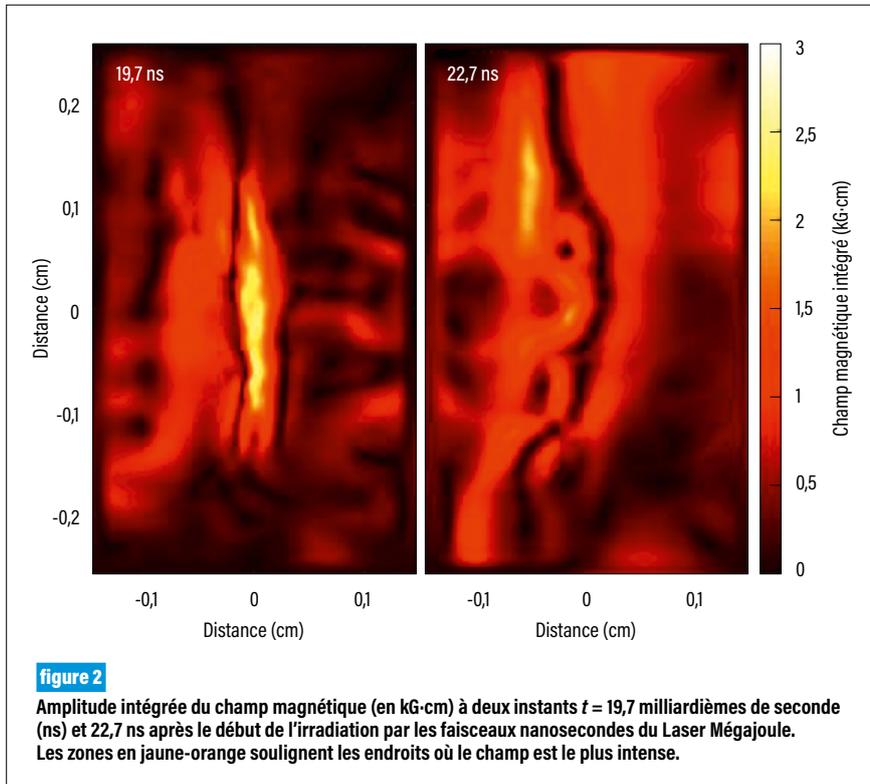
Connu depuis cinquante ans, un scénario d'amplification du champ magnétique repose sur l'effet dynamo où les lignes de champ magnétique et de courant sont enlacées dans le plasma turbulent **2**. L'effet dynamo turbulent explique par exemple la présence d'un champ magnétique dans les étoiles telles que le Soleil. Il se manifeste lorsque les fluctuations du plasma sont assez fortes pour amplifier de petites variations initiales du champ magnétique. Des simulations numériques récentes montrent que cet effet pourrait aussi être à l'origine de l'amplification d'un facteur 10^{14} du champ magnétique interstellaire **2**.

Pour progresser dans la compréhension de ce phénomène, les astrophysiciens disposent d'observations astrophysiques, de simulations numériques et exploitent, depuis quelques années, des expériences de laboratoire utilisant les installations laser les plus énergétiques au monde. La validité de cette dernière approche repose sur l'existence de ce qu'on appelle des lois d'échelle, bien établies pour décrire les mouvements des plasmas. C'est le domaine de l'astrophysique de laboratoire.



Comment mesurer l'effet dynamo turbulent ?

Pour l'étude expérimentale de la dynamo turbulente, la difficulté était de réussir, d'une part, à créer en laboratoire les conditions de plasmas *ad hoc* pour que ces phénomènes d'amplification se développent. D'autre part, il fallait disposer d'un moyen de mesure performant pour mettre en évidence l'accroissement du champ magnétique au sein du plasma. L'installation Laser Mégajoule (LMJ)-Petal est particulièrement adaptée pour relever ce double défi. En effet, la grande énergie disponible dans les faisceaux du LMJ permet de créer un plasma dans un régime turbulent non étudié jusqu'alors et le laser ultrabref Petal est ensuite utilisé pour caractériser le plasma avec des protons de très haute énergie **3** déviés par le champ magnétique auto-induit dans



le plasma (voir p. 10-11). Le faisceau de protons créé avec le laser Petal offre en effet des performances inégalées en matière de résolutions spatiale et temporelle **3**.

Des études préliminaires effectuées sur d'autres lasers **4** ont conduit à un édifice expérimental constitué d'une cible principale où le plasma turbulent est généré avec le LMJ, et d'une cible secondaire irradiée par Petal pour sonder la présence de champs magnétiques (figure 1). La cible principale, constituée de deux feuilles d'aluminium situées en face l'une de l'autre, est chauffée par les faisceaux du LMJ, provoquant la vaporisation des feuilles et la formation de deux flots de plasma d'aluminium entrant en collision frontale (figure 1). La turbulence est créée lorsque les flots traversent les grilles et elle s'amplifie lors de la collision des deux flots. La zone de rencontre des plasmas est alors sondée à l'aide d'un faisceau de protons issu de la

cible secondaire irradiée par Petal **3**. En traversant le plasma turbulent au centre de la cible LMJ, les protons sont déviés par les champs magnétiques. La mesure des déflexions enregistrées par un film situé au voisinage de la cible principale dans l'axe opposé à Petal permet de remonter aux valeurs des champs et à leur distribution spatiale.

Des résultats en contradiction avec les prévisions initiales

Les résultats typiques obtenus sont présentés sur la figure 2, pour deux expériences où le plasma turbulent a été sondé avec Petal à deux instants différents après le début de l'irradiation par les faisceaux de chauffage. Un travail important d'analyse inverse de signaux permet de déduire quantitativement les valeurs des champs sondés. Ces images confirment bien la présence d'un champ magnétique initialement absent et créé par les processus turbulents.

Néanmoins, l'amplification du champ est moindre que celle prédite par des simulations numériques sophistiquées **5**. En effet, l'effet dynamo est supposé être moins efficace dans des conditions de turbulence supersonique **2**, telles que celles atteintes pour la première fois grâce aux faisceaux énergétiques du LMJ.

Ainsi, pour la première fois, l'inefficacité du processus d'amplification du champ magnétique par effet dynamo a pu être démontrée en laboratoire pour des plasmas supersoniques turbulents. La montée en puissance du Laser Mégajoule du CEA – DAM permettra de créer de la turbulence en régime entretenu dans des conditions encore plus extrêmes de température : une perspective enthousiasmante pour essayer de résoudre le mystère des origines du champ magnétique interstellaire !

RÉFÉRENCES

- 1** A. F. A. Bott *et al.*, « Inefficient magnetic-field amplification in supersonic laser-plasma turbulence », *Phys. Rev. Lett.*, **127**, 175002 (2021).
- 2** M. R. Krumholz, C. Federrath *et al.*, « The role of magnetic fields in setting the star formation rate and the initial mass function », *Front. Astron. Space Sci.*, **6**, p. 7 (2019).
- 3** D. Raffestin *et al.*, « Enhanced ion acceleration using the high-energy petawatt PETAL laser », *Matter and radiation at extremes*, **6**, 056901 (2021).
- 4** P. Tzeferacos *et al.*, « Laboratory evidence of dynamo amplification of magnetic fields in a turbulent plasma », *Nature Communications*, **9**, 591 (2018).
- 5** P. Tzeferacos *et al.*, « Numerical modelling of laser-driven experiments aiming to demonstrate magnetic field amplification via turbulent dynamo », *Phys. Plasmas*, **24**, 041404 (2017).

A. Casner [CEA – DAM, centre du Cesta]

É. Falize, L. Masse [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France]

O. Poujade [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France]

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

G. Rigon, M. Koenig, B. Albertazzi, P. Mabey, T. Michel, T. Vinci

[Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (Luli), UMR 7605 CNRS – CEA – École polytechnique – Université Pierre-et-Marie-Curie, Palaiseau]

V. Bouffetier, L. Ceurvorst, F. Barbato [Centre lasers intenses et applications (Celia),

UMR 5107 CNRS – CEA – Université de Bordeaux, Talence]

N. Ozaki, N. Kamimura, K. Katagiri, Y. Umeda, R. Kodama [Graduate School of Engineering,

Osaka University, Osaka, Japon]

Y. Inubushi, K. Miyanishi, K. Sueda, T. Togashi, M. Yabashi, T. Yabuuchi [Riken SPring-8 Center, Hyogo, Japon]

G. Gregori [Department of Physics, University of Oxford, Royaume-Uni]

M. J.-E. Manuel [General Atomics, Inertial Fusion Technologies, San Diego, Californie, États-Unis]

De la turbulence astrophysique à celle des plasmas créés par laser

Il est aujourd'hui possible de reproduire en laboratoire, grâce aux lasers de puissance, les phénomènes les plus extrêmes que l'on rencontre dans l'Univers. Pourtant, il en est un qui ne se laisse pas dompter facilement : c'est la turbulence. En s'inspirant des restes de supernova, une collaboration internationale conduite par le CEA – DAM a réalisé une expérience innovante [1](#) qui a permis de produire de manière inédite et de caractériser dix fois mieux qu'auparavant un gaz bouleversé par la turbulence.

Quel est le point commun entre les grandes structures cosmologiques, le cœur des étoiles massives et les plasmas thermonucléaires du programme Simulation du CEA – DAM ? Tous ces objets sont le siège du phénomène de turbulence qui modifie leurs propriétés physiques au cours du temps. La turbulence désigne l'état de l'écoulement d'un fluide (gaz ou liquide) dans lequel la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire.

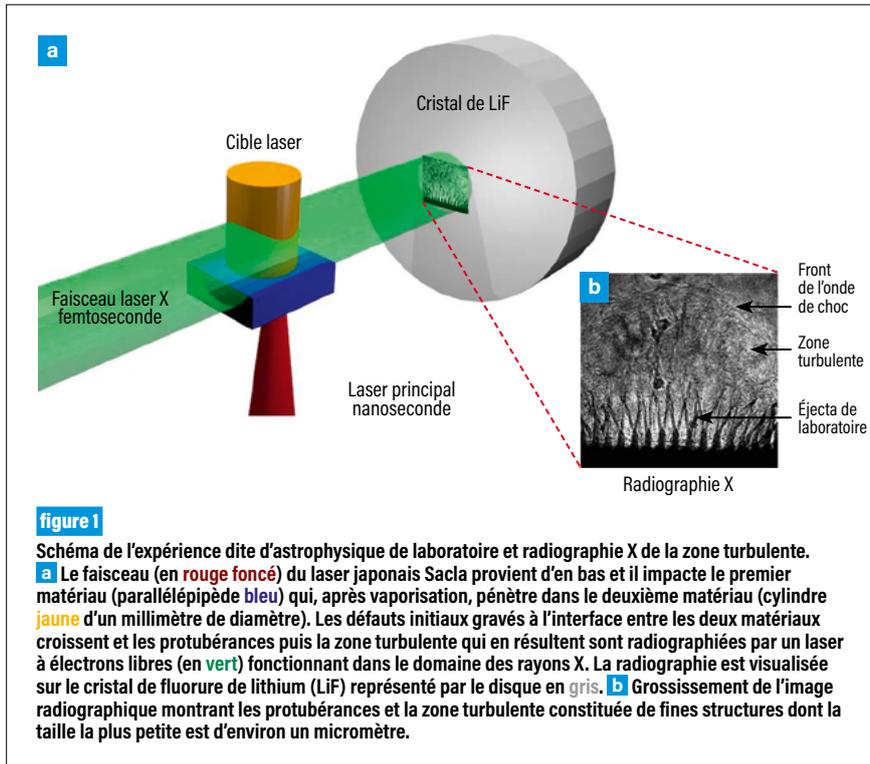
La simulation numérique de ces écoulements a fait un bond en avant ces dernières années grâce à la nouvelle génération de supercalculateurs, qui permettent de travailler avec des maillages à la finesse sans précédent. Il est ainsi possible aujourd'hui de mieux décrire le transfert d'énergie en cascade des grandes échelles spatiales vers les plus petites, caractéristique des écoulements turbulents. Il est néanmoins fondamental de confronter la simulation à l'expérience.

Lors de l'explosion d'une étoile massive (supernova), la matière éjectée à grande vitesse (éjecta) provoque une onde de choc qui se propage dans le

milieu environnant l'étoile et conduit à la formation d'un mélange turbulent. Ce scénario est déduit de l'observation des quelques supernovæ de la Voie lactée et des modèles d'évolution stellaire. Pour confirmer ce scénario et produire le mélange turbulent en laboratoire, la collaboration a mis au point, grâce à des formules mathématiques appelées lois d'échelle, une expérience dans laquelle les phénomènes physiques sont censés se dérouler d'une manière représentative de la configuration astrophysique [2,3](#).

Dans l'expérience réalisée auprès du laser Sacla au Japon, le laser est focalisé pendant quelques milliardièmes de seconde sur un édifice constitué de deux matériaux superposés. Le matériau directement en contact avec le laser est vaporisé et s'étend brutalement en créant une onde de choc. Il joue le rôle de l'étoile en éjectant une partie de sa masse qui pénètre dans l'autre matériau, moins dense. Ce dernier joue le rôle du milieu environnant l'étoile où le choc se propage et où la turbulence se développe. Pour faire apparaître cette turbulence plus rapidement, des défauts ont été gravés à l'interface entre les deux matériaux. Comme le deuxième est moins dense, une instabilité se développe et les défauts s'amplifient en formant de longues et étroites protubérances qui vont progressivement mener à une zone de mélange turbulent ([figure 1](#)).

Alors que le début de l'évolution des défauts à l'interface, c'est-à-dire avant que la zone turbulente ne se forme, est observable par les radiographies à rayons X classiques disponibles sur les lasers de puissance [2,3](#), l'observation tant recherchée de l'étape de transition vers la turbulence et de la structure de la zone de mélange turbulent réclamait la mise en place d'un nouveau moyen de mesure. Celui qui a été utilisé



combine un laser dit à électrons libres éclairant également dans le domaine des rayons X et un cristal de fluorure de lithium LiF (figure 1a). Ce laser émet un flash de lumière qui radiographie le mélange turbulent dans un laps de temps plus court de plusieurs ordres de

grandeur que la durée d'impulsion du laser Sacla; l'image produite est enregistrée par le cristal de LiF.

Sur l'image de la radiographie de la figure 1b, en plus de l'onde de choc et des éjecta de laboratoire, une zone turbulente est visible, constituée de

minuscules structures dont la taille des plus petites est de l'ordre du micromètre. Cette observation détaillée est dix fois plus fine que celle obtenue par les radiographies à rayons X classiques, ce qui permettra de tester et au besoin d'améliorer les simulations. Elle confirme aussi le scénario astrophysique qui mène à la turbulence.

Ces trois éléments indiqués sur la figure 1b se retrouvent à l'échelle astrophysique, comme le montre le cliché du reste de supernova RCW86 présenté sur la figure 2; cela montre aussi la pertinence des lois d'échelle. La qualité des données expérimentales a permis à la collaboration de confirmer que le transfert d'énergie se fait bien en cascade des grandes structures vers les petites structures, en accord avec l'observation astrophysique et les prévisions de la théorie de la turbulence.

La suite de ces travaux? Étudier l'impact du rayonnement émis par l'étoile qui mène à la supernova sur le développement de ces écoulements turbulents. C'est une question centrale en astrophysique et dans de nombreuses activités duales. En plus d'être aujourd'hui accessibles par la simulation numérique, ces écoulements sont en train de le devenir aussi en laboratoire grâce au Laser Mégajoule qui pourra accueillir de telles expériences.



RÉFÉRENCES

- 1 G. Rigon, B. Albertazzi, T. Pikuz, P. Mabey, V. Bouffetier, N. Ozaki, T. Vinci, F. Barbato, É. Falize et al., « Micron-scale phenomena observed in a turbulent laser-produced plasma », *Nature Comm.*, **12**, 2679 (2021).
- 2 G. Rigon, A. Casner, B. Albertazzi, T. Michel, P. Mabey, É. Falize et al., « Rayleigh-Taylor instability experiments on the LULI2000 laser in scaled conditions for young supernova remnants », *Phys. Rev. E*, **100**, 021201 (2019).
- 3 G. Rigon, B. Albertazzi, P. Mabey, T. Michel, É. Falize et al., « Exploring the Atwood-number dependence of the highly nonlinear Rayleigh-Taylor instability regime in high-energy-density conditions », *Phys. Rev. E*, **104**, 045213 (2021).

F. Soubiran [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire matière en conditions extrêmes (LMCE), Bruyères-le-Châtel]
A. Ravasio [Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (Luli),
UMR 7605 CEA - CNRS – École polytechnique, Palaiseau]

Des super-Terres en laboratoire

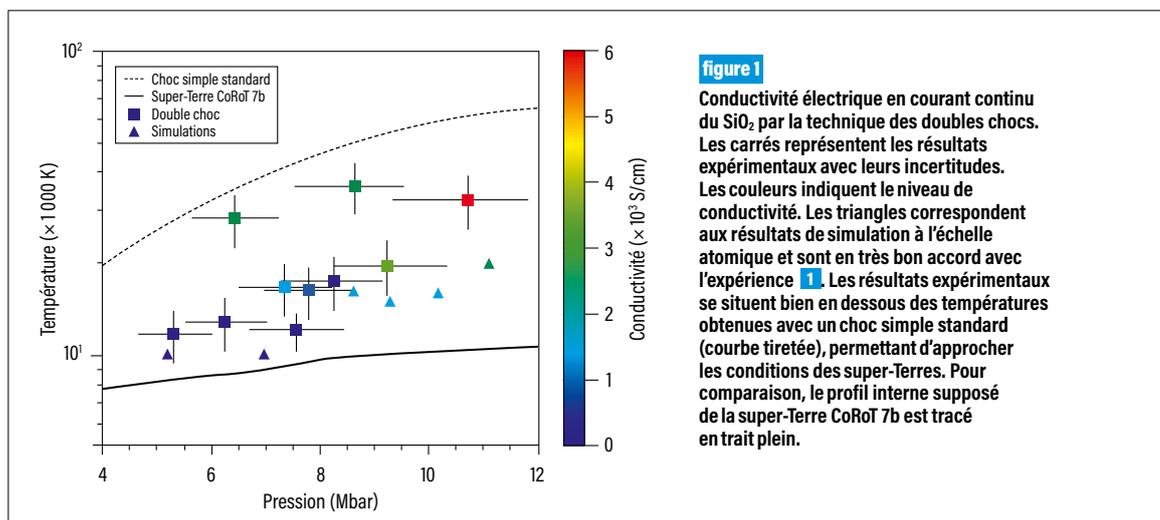
De nombreuses planètes ont récemment été détectées en dehors du système solaire. Certaines sont appelées super-Terres, car elles sont probablement rocheuses comme la Terre et leur taille peut atteindre jusqu'à deux fois la sienne. Dans ces nouveaux mondes, un champ magnétique, s'il existe, pourrait être favorable à la vie. Pour savoir si un champ magnétique peut exister, le CEA – DAM et le Luli à Palaiseau se sont associés pour réaliser des expériences novatrices et des simulations numériques qui ont permis de déterminer que le champ magnétique d'une super-Terre pouvait être produit dans le manteau fait de silicates fondus, sans nécessiter un cœur de fer liquide comme sur Terre **1**.

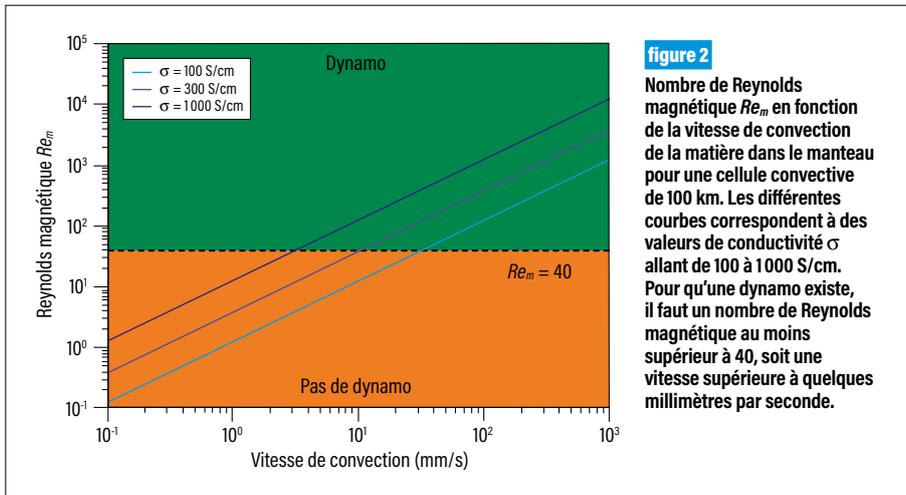
Les super-Terres, ces exoplanètes rocheuses plus grosses que la Terre, font partie des candidats favoris pour la recherche de vie extraterrestre. Étant relativement grosses, elles sont en effet plus faciles à observer que des objets de taille comparable ou inférieure à celle de la Terre. À ce jour, presque rien n'est connu de ces planètes et de nombreuses questions demeurent concernant

leur habitabilité – leur propension à héberger la vie. Certains scientifiques pensent que l'existence d'un champ magnétique peut être un élément favorable à l'émergence et au développement de la vie sur une planète. Dans le cas des super-Terres, l'existence d'un champ magnétique n'est pas garantie, car il pourrait ne pas y avoir de cœur de fer liquide, générateur comme dans le noyau de la Terre d'un effet dynamo.

Le champ magnétique des super-Terres

Les travaux théoriques et numériques montrent que lorsqu'un fluide conducteur a un mouvement convectif suffisamment vigoureux, un champ magnétique peut être créé par effet dynamo. C'est le cas du cœur de fer liquide de la Terre. Pour les super-Terres, ce cœur de fer, s'il existe, pourrait être solide et ne pas permettre un effet dynamo. En revanche, les températures internes peuvent être compatibles avec un manteau partiellement fondu qui pourrait être assez conducteur pour être le siège d'un effet dynamo.





Les scientifiques utilisent une quantité appelée nombre de Reynolds magnétique pour prédire l'existence ou non d'un effet dynamo. Ce nombre dépend fortement des processus internes de conduction électrique. Dans l'attente d'observations astronomiques rendant possibles la détection d'un champ magnétique exoplanétaire, des simulations numériques et des expériences à haute pression peuvent être entreprises.

Des chocs par laser pour explorer la matière dense

À défaut de pouvoir observer directement les intérieurs de super-Terres, il est envisageable de reproduire les conditions de température et de pression qui y règnent et d'observer les propriétés de la matière. C'est en soi un défi, car les intérieurs de super-Terres peuvent atteindre des températures de l'ordre de 10 000 °C et des pressions de l'ordre de 10 millions d'atmosphères (10 Mbar) – ce qui revient à concentrer la masse de cinq tours Eiffel sur un timbre-poste. Une possibilité est d'utiliser des lasers intenses pour générer une onde de choc qui comprime très rapidement le matériau pour atteindre les pressions d'intérêt. Mais comprimer aussi violemment induit une augmentation de température trop importante par rapport aux conditions présentes dans les super-Terres. L'avancée majeure réalisée dans cette étude a été de produire deux chocs successifs, appelés double choc, très bien caractérisés, ce qui a permis d'atteindre

des pressions très élevées tout en maintenant des températures modérées et des conditions approchant celles des intérieurs de super-Terres.

Le SiO₂, un matériau conducteur

L'étude [1](#) s'est portée sur un silicate particulier, le dioxyde de silicium (SiO₂), car c'est l'un des composés que les scientifiques pensent être présents en grande quantité dans les intérieurs de super-Terres. C'est aussi un matériau servant d'étalon standard pour les expériences de chocs menées par le CEA – DAM et toute amélioration de sa caractérisation permet d'augmenter la précision des expériences qui l'utilisent comme référence. Des simulations numériques récentes à l'échelle atomique ont prédit qu'à très haute pression, lorsque le SiO₂ fondait, il devenait conducteur d'électricité [2](#). Dans l'expérience menée sur le laser Luli2000 à l'École polytechnique, non seulement des doubles chocs ont été générés dans le SiO₂ pour atteindre les conditions de pression et de température adéquates, mais aussi les propriétés optiques de l'échantillon ont été mesurées. En combinant les observations expérimentales et des simulations numériques atomiques, il a été possible de déduire la conductivité électrique associée aux propriétés optiques mesurées. Les résultats sont reproduits sur la [figure 1](#). L'étude a permis de véritablement estimer cette conductivité pour la première fois pour chaque point expérimental de pression et de température.

Il apparaît que le SiO₂ est effectivement conducteur dans sa phase liquide à très haute pression.

La [figure 2](#) montre qu'avec une conductivité telle que déterminée à partir de l'expérience, il suffit d'une vitesse convective de la matière dans le manteau de quelques millimètres par seconde à quelques centimètres par seconde pour atteindre un nombre de Reynolds magnétique suffisamment élevé (valeur supérieure à 40) afin qu'un champ magnétique soit créé. Il est donc vraisemblable que le champ magnétique des super-Terres puisse provenir de l'effet dynamo créé par le mouvement des silicates liquides constituant le manteau. Ces mesures aideront les astrophysiciens à caractériser l'habitabilité des nouvelles planètes découvertes.

Enfin, les points expérimentaux obtenus permettront aussi au CEA – DAM d'augmenter encore la précision des futures expériences qui utilisent le SiO₂ comme étalon standard.

RÉFÉRENCES

- [1](#) M. Guarguaglini, F. Soubiran, J.-A. Hernandez, A. Benuzzi-Mounaix, R. Bolis, E. Brambrink, T. Vinci, A. Ravasio, « Electrical conductivity of warm dense silica from double-shock experiments », *Nature Communications*, **12**, 840 (2021).
- [2](#) F. Soubiran, B. Militzer, « Electrical conductivity and magnetic dynamos in magma oceans of Super-Earths », *Nature Communications*, **9**, 3883 (2018).

X. Davoine, L. Gremillet [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire matière en conditions extrêmes (LMCE), Bruyères-le-Châtel]
A. Sampath, M. Tamburini [Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg, Allemagne]
S. Corde, M. Gilljohann [Laboratoire d'optique appliquée (LOA), Palaiseau]

Premier test en vue pour la production d'un faisceau gamma de densité extrême

La production de champs électromagnétiques ultra-intenses conduit à des phénomènes extraordinaires, comme la génération très abondante de photons gamma. Ces phénomènes sont décrits théoriquement de longue date et sont invoqués pour expliquer le comportement de certains objets astrophysiques méconnus. Cependant, leur étude expérimentale en laboratoire reste encore limitée et difficile, d'où l'importance d'un nouveau concept d'expérience simple à mettre en œuvre qu'une équipe du CEA – DAM a proposé au sein d'une collaboration internationale pour atteindre de tels régimes **1**. Une première expérience est d'ores et déjà programmée et aura lieu aux États-Unis dans les prochains mois.

Créer de la matière uniquement à partir de lumière, telle est l'une des promesses d'une théorie appelée l'électrodynamique quantique en champ fort ! Cette théorie décrit les processus physiques qui apparaissent lorsque des champs électromagnétiques ultra-intenses interagissent avec des particules chargées ou des photons. Ces derniers peuvent alors se désintégrer en une paire composée d'un électron et d'un positron – l'antiparticule de l'électron, de même masse que celui-ci mais de charge positive. L'arrivée de lasers ultra-intenses et d'accélérateurs de particules de nouvelle génération permet d'envisager l'étude de cette théorie en laboratoire.

Nouveau concept expérimental

L'accélérateur du Slac en Californie est capable de générer des faisceaux d'électrons relativistes (vitesse très proche de celle de la lumière), caractérisés par une grande densité : le faisceau est constitué d'un paquet de dix milliards d'électrons occupant un

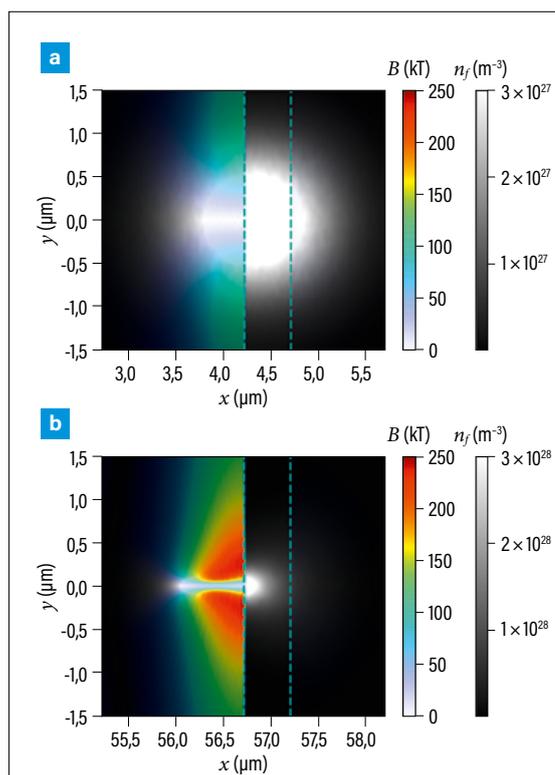


figure 1

Évolution (coupe 2D) du faisceau d'électrons et de ses champs propres lors de la traversée **a** de la première feuille d'aluminium et **b** de la sixième feuille (le faisceau se propage de gauche à droite, parallèlement à l'axe x). La carte en couleurs du champ magnétique B entourant le faisceau est superposée à celle de la densité du faisceau n_f (échelle de noir à blanc). Les deux faces de chaque cible plane d'aluminium, de $0,5 \mu\text{m}$ d'épaisseur, sont représentées par les traits verticaux en pointillé ($x = 4,2$ et $4,7 \mu\text{m}$ sur la figure **a**) : elles réfléchissent le champ propre. Lors de la traversée des premières feuilles, le faisceau se resserre autour de l'axe $y = 0$ (effet de focalisation) et sa densité et l'amplitude de ses champs propres sont augmentées.

minuscule volume de taille micrométrique. Le faisceau, grâce à sa charge et à son courant, génère un champ électrique et magnétique autour de lui, appelé champ propre. Avec le faisceau dense du Slac, ces champs sont de très grande amplitude, de l'ordre de la centaine de kiloteslas (kT) pour le champ magnétique, soit environ dix mille fois plus que le champ produit avec les aimants les plus puissants.

Initialement, les forces électrique et magnétique s'annulent. Cependant, lors de la rencontre du faisceau avec une cible plane d'aluminium (feuille de $0,5 \mu\text{m}$ d'épaisseur), ces champs sont réfléchis à la surface de la cible : le champ électrique s'annule alors que l'amplitude du champ magnétique double. La force magnétique accélère alors violemment les électrons vers le centre du faisceau, conduisant à une très forte focalisation de ce dernier (figure 1a). Cette force colossale exercée sur des électrons relativistes

permet d'entrer marginalement dans le régime d'électrodynamique quantique en champ fort : un grand nombre de photons gamma sont émis par les électrons ainsi déviés et une petite fraction de ces photons interagit avec le champ magnétique intense et se désintègre en une paire d'électron-positron.

Atteinte du régime de champ fort

Les électrons étant ramenés vers le centre du faisceau, celui-ci se concentre autour de son axe après une propagation sur plusieurs microns. Cette focalisation entraîne l'augmentation de sa densité, ainsi que de l'amplitude des champs propres qui se régénèrent dans le vide à la sortie de la cible. La traversée de cible est répétée plusieurs fois : le faisceau interagit avec une succession de feuilles d'aluminium espacées de $10 \mu\text{m}$, les effets s'amplifiant à chaque nouvelle feuille.

L'équipe du CEA – DAM et les coauteurs de cet article ont démontré l'intérêt de ce concept expérimental à l'aide de simulations numériques réalisées en collaboration avec des chercheurs de l'université de Boulder, au Colorado, du Laboratoire national de l'accélérateur du Slac, de l'université de Californie à Los Angeles et de l'université Stanford, aux États-Unis [1]. Elle a ainsi montré que la densité du faisceau est augmentée d'un facteur proche de 20 puis 80 lors de la traversée de la sixième (figure 1b) puis de la septième feuille respectivement. Elle a aussi montré que le champ magnétique est augmenté d'un facteur 2,5 puis 10 dans ces feuilles. Avec ces valeurs, le régime de champ fort est atteint. Une production très abondante de photons conduit à la génération d'un faisceau de photons gamma ayant une densité de $2 \times 10^{29} \text{ m}^{-3}$, une valeur phénoménale, de l'ordre de la densité des atomes dans un solide ! L'efficacité des processus est maximale à la septième feuille. À partir de la huitième, le faisceau d'électrons se dégrade. Néanmoins, plus de 25 % de l'énergie du faisceau est convertie en photons gamma après la quinzième feuille (figure 2).

Une première expérience est programmée en 2022 sur l'accélérateur du Slac, ce qui permettra de confronter les codes de simulation du CEA – DAM à l'expérience. Parallèlement aux applications astrophysiques, la validation des codes et la compréhension de ce régime sont importantes pour le développement de sources gamma extrêmement intenses qui peuvent avoir un intérêt dans le cadre des programmes du CEA – DAM pour l'étude de réactions photonucléaires ou pour sonder la matière dense.

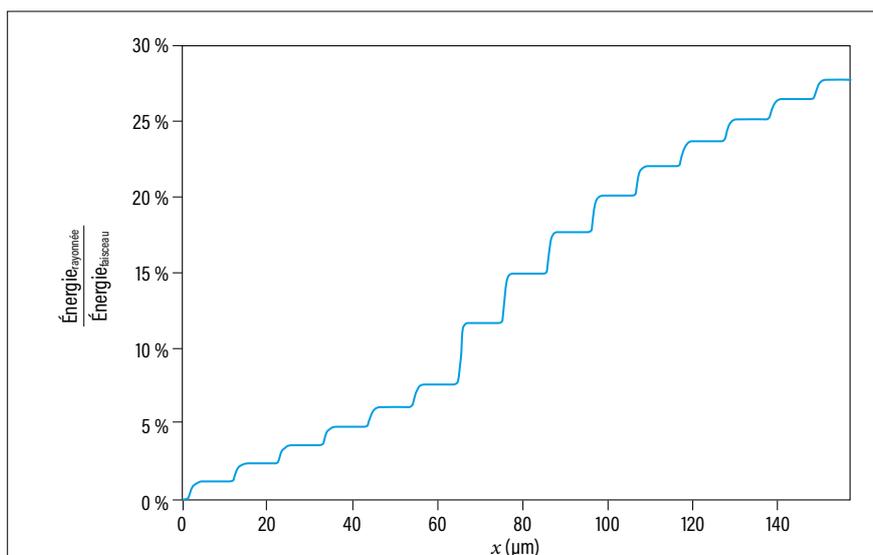


figure 2

Évolution du rapport de l'énergie rayonnée sous forme de photons gamma à l'énergie du faisceau d'électrons incident obtenue par l'équipe du CEA – DAM en fonction de la distance de propagation de celui-ci, grâce à la simulation numérique. Chaque saut correspond au franchissement d'une feuille d'aluminium. Un taux de conversion supérieur à 25 % est atteint après la quinzième feuille : un faisceau de photons gamma extrêmement dense est ainsi créé, ce qui sera bientôt vérifié expérimentalement.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Sampath, X. Davoine, S. Corde, L. Gremillet *et al.*, « Extremely dense gamma-ray pulses in electron beam-multifoil collisions », *Phys. Rev. Lett.*, **126**, 064801 (2021).

J.-F. Ripoll [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire matière en conditions extrêmes (LMCE), Bruyères-le-Châtel]
T. Farges [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France]
D. M. Malaspina [University of Colorado, Boulder, Colorado, États-Unis]
G. S. Cunningham, E. H. Lay [Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, Nouveau Mexique, États-Unis]
G. B. Hospodarsky [University of Iowa, Iowa City, Iowa, États-Unis]
S. Pedeboy [Météorage, Pau]

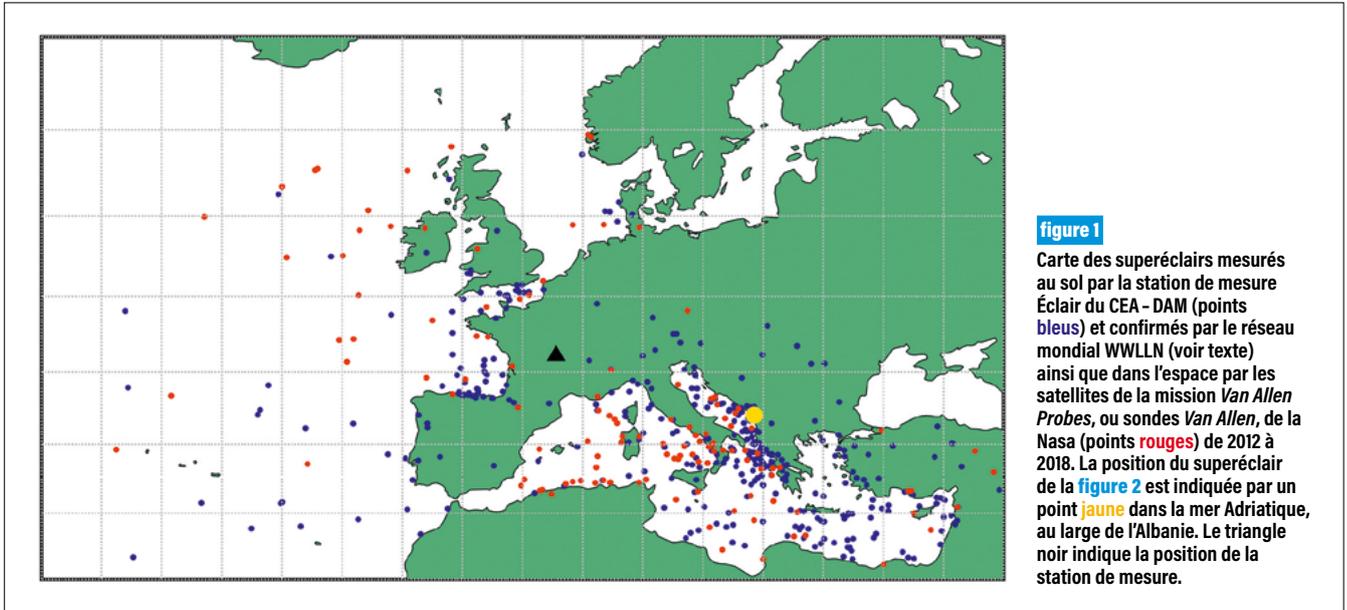
Première mesure de la puissance électromagnétique des superéclairs

Les éclairs les plus puissants, ou superéclairs, étaient jusqu'à récemment identifiés par leur extrême luminosité. Aujourd'hui, c'est la puissance électromagnétique hors norme de ces événements qui est révélée pour la première fois grâce à une double mesure au sol et depuis l'espace réalisée dans le cadre d'une collaboration internationale [1](#). Le CEA – DAM travaille à la caractérisation des ondes électromagnétiques comme les éclairs, qui modifient le comportement d'électrons de haute énergie évoluant dans l'espace proche de la Terre ; en effet, ces électrons peuvent endommager l'électronique embarquée des satellites.

Parmi les éclairs, les plus puissants détectés depuis l'espace dès la fin des années soixante-dix n'ont cessé d'intriguer les scientifiques tant leur puissance lumineuse est importante, jusqu'à un facteur 1 000 par rapport à celle d'un éclair normal. Ces mesures spatiales de superéclairs viennent d'être associées en 2019 à des mesures électromagnétiques faites à partir d'un réseau mondial de stations de mesure au sol, appelé *World-Wide Lightning Location Network* (WWLLN) et regroupant une cinquantaine d'instituts de recherche. Ces mesures remarquables montrent que les éclairs les plus puissants sont très rares (environ trois événements par jour contre environ 45 éclairs par seconde dans le monde entier), qu'ils se produisent en hiver, au-dessus de la mer et plutôt de nuit, exactement à l'opposé d'un éclair normal, ajoutant au mystère des origines de cette puissance [2](#). Leur plus grand nombre se situe dans les régions de l'Atlantique Nord-Ouest et de la Méditerranée ([figure 1](#)), plaçant la station Éclair du CEA – DAM aux premières loges.

Au CEA – DAM, la puissance électromagnétique des éclairs est étudiée, car cette source d'énergie interagit avec les électrons énergétiques qui tournent autour de la Terre en étant piégés par le champ magnétique terrestre, et ces électrons, dits tueurs d'électroniques, peuvent endommager l'électronique embarquée des satellites. Or, par des processus complexes mais bien identifiés, les ondes des éclairs contribuent à réduire naturellement le nombre de ces électrons, ce qui est bénéfique pour les satellites. Dans le cadre d'une collaboration internationale impliquant le CEA – DAM et le Los Alamos National Laboratory regroupés au sein de l'accord entre le CEA – DAM et le DOE – NNSA, ainsi que les universités de l'Iowa, du Minnesota et du Colorado aux États-Unis, une équipe du CEA – DAM a entrepris en 2019-2020 le recensement de la puissance électromagnétique de tous les éclairs à partir de sept années de données satellitaires recueillies lors de la mission nommée *Van Allen Probes* (sondes *Van Allen*) de la Nasa [3](#). Elle a ainsi découvert que la puissance électromagnétique moyenne des éclairs est contrôlée pour moitié par les superéclairs. L'idée de chercher à caractériser leur puissance électromagnétique s'est alors naturellement imposée, ce qui permettra de mieux décrire le comportement des électrons piégés dans les ceintures de Van Allen.

Des mesures au sol conduites par le CEA – DAM, recoupées avec celles de WWLLN et celles de la société française Météorage, ont alors permis à cette équipe de localiser les superéclairs d'énergie estimée à plus d'un mégajoule (1 000 fois celle d'un éclair normal) et dans un rayon de 1 500 km autour de la station Éclair du CEA (points bleus sur la carte de la [figure 1](#)). Elles révèlent une très grande puissance électromagnétique associée aux courants intenses de l'éclair qui remontent du sol au nuage. Par ailleurs, leurs ondes électromagnétiques ont été détectées jusque dans l'espace par les sondes


figure 1

Carte des superéclairs mesurés au sol par la station de mesure Éclair du CEA - DAM (points bleus) et confirmés par le réseau mondial WWLLN (voir texte) ainsi que dans l'espace par les satellites de la mission *Van Allen Probes*, ou sondes *Van Allen*, de la Nasa (points rouges) de 2012 à 2018. La position du superéclair de la **figure 2** est indiquée par un point jaune dans la mer Adriatique, au large de l'Albanie. Le triangle noir indique la position de la station de mesure.

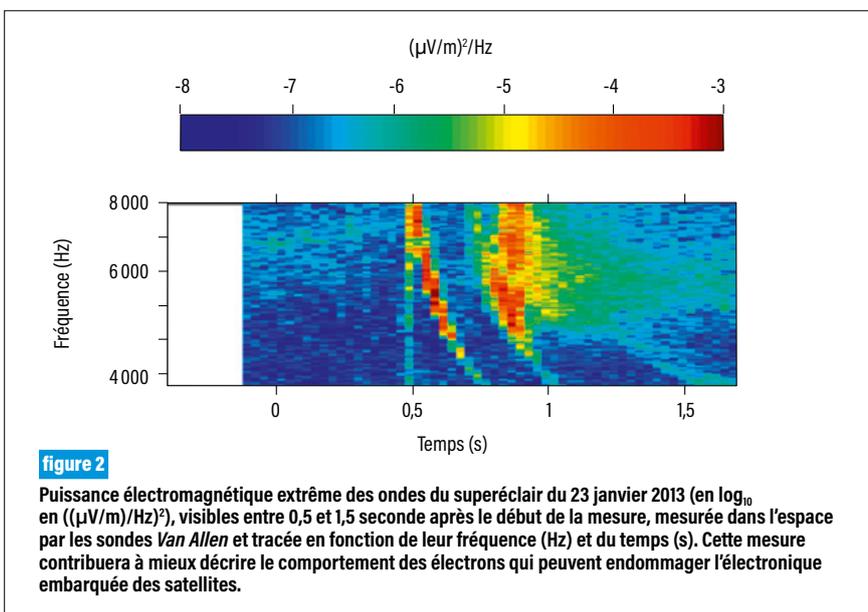
Van Allen, évoluant parfois jusqu'à plus de 10 000 km de la source de l'éclair (points rouges sur la carte). Là encore, la puissance électromagnétique est de 10 à 1 000 fois supérieure à celle d'un éclair normal, en accord avec l'extrême puissance lumineuse mesurée, corroborant le caractère extrême des superéclairs **1**.

Un des événements les mieux mesurés se produisit le 23 janvier 2013 dans la mer Adriatique, au large de l'Albanie, avec une énergie estimée de 1,2 mégajoule (point jaune sur la carte). Sa puissance électrique mesurée dans l'espace par les sondes *Van Allen* est représentée en fréquence et en temps

sur la **figure 2**. Elle présente deux signaux successifs entre $t=0,5$ et $t=1,5$ seconde qui ont tous deux une forme d'accent grave **1**. Une analyse fine des composantes des signaux démontre que chacune d'entre elles est associée à une latitude différente de pénétration des ondes du superéclair dans l'ionosphère et à un chemin différent emprunté par chacune d'elles pour atteindre le satellite. Ce superéclair est ainsi parfaitement isolé et suivi du sol à l'espace. Les mesures permettent de mettre en évidence plusieurs propriétés des superéclairs : une forte atténuation de la puissance électromagnétique

lors de la propagation d'un facteur cent millions, une forme symétrique de l'onde électromagnétique au sol, de très forts courants, une puissance confinée dans les très basses fréquences et une absence du signal dans l'espace le jour **1**.

Plus largement, cette étude publiée dans *Nature Communications* **1** a des implications pour la physique théorique et numérique des décharges, la transmission et le suivi d'ondes électromagnétiques lors de leur propagation dans l'espace, la météo spatiale, le changement climatique et la détection de signaux à distance (du sol à l'espace ou depuis l'espace), des sujets traités à la Direction des applications militaires et à la Direction de la recherche fondamentale du CEA.


figure 2

Puissance électromagnétique extrême des ondes du superéclair du 23 janvier 2013 (en \log_{10} en $(\mu\text{V}/\text{m})^2/\text{Hz}$), visibles entre 0,5 et 1,5 seconde après le début de la mesure, mesurée dans l'espace par les sondes *Van Allen* et tracée en fonction de leur fréquence (Hz) et du temps (s). Cette mesure contribuera à mieux décrire le comportement des électrons qui peuvent endommager l'électronique embarquée des satellites.

RÉFÉRENCES

- 1** J.-F. Ripoll, T. Farges, D. M. Malaspina, E. H. Lay, G. S. Cunningham, G. B. Hospodarsky *et al.*, « Electromagnetic power of lightning superbolts from Earth to space », *Nature Communications*, **12**, 3553, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23740-6> (2021).
- 2** R. H. Holzworth, M. P. McCarthy, J. B. Brundell, A. R. Jacobson, C. J. Rodger, « Global distribution of superbolts », *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **124**, p. 9996-10005 <https://doi.org/10.1029/2019JD030975> (2019).
- 3** J.-F. Ripoll, T. Farges, E. H. Lay, G. S. Cunningham, « Local and statistical maps of lightning-generated wave power density estimated at the Van Allen Probes footprints from the World-Wide Lightning Location Network database », *Geophys. Res. Lett.*, **46**, <https://doi.org/10.1029/2018GL081146> (2020).

Vers la découverte d'une nouvelle radioactivité

Comment s'organisent les protons et les neutrons au sein d'un noyau d'atome ? Pour répondre à cette question, de nombreux défis théoriques sont à surmonter. Les noyaux sont en effet des systèmes dont la complexité se traduit par une richesse de comportements telle que l'ensemble de leurs propriétés (forme, types d'excitation, modes de désexcitation, etc.) n'est pas connu. Un travail théorique récent **1** mené par une collaboration entre le CEA – DAM et le laboratoire IJCLab progresse dans cette quête en dévoilant l'existence d'une nouvelle forme de désintégration radioactive, ou nouvelle radioactivité, à portée des expériences.

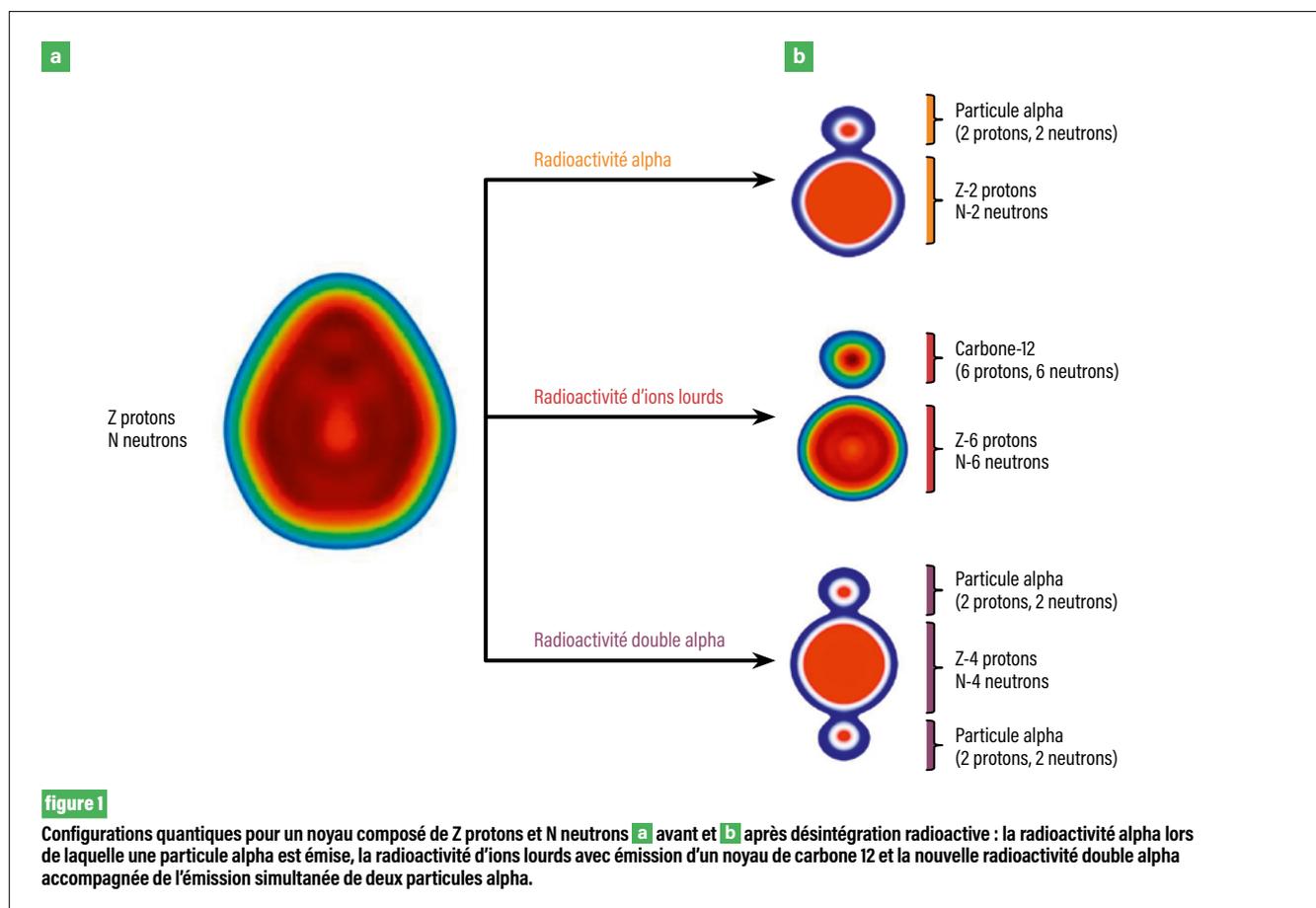
Dans ses cours **2**, le Prix Nobel de physique R. Feynman interroge : « *Si toute la connaissance scientifique disparaissait dans un cataclysme, quelle phrase unique pourrait préserver le maximum d'information pour les générations futures ?* »

Et de répondre : « *Toutes choses sont faites d'atomes.* » Mais à quoi ressemble un atome ? Dans l'imaginaire collectif, sa représentation la plus courante est celle d'un système planétaire en miniature, où des électrons semblables à de petites billes orbitent autour d'un noyau sphérique. La physique moderne en donne une tout autre image ! Les électrons se délocalisent dans des nuages de probabilité entourant le noyau – les orbitales électroniques – dont les formes se déduisent de l'équation dite de Schrödinger. Cette équation décrit le comportement quantique des électrons liés au noyau par la force électromagnétique, c'est-à-dire les différentes configurations des électrons au sein des orbitales ainsi que l'énergie de ces dernières. Les propriétés chimiques des atomes (désexcitation par émission de lumière, transfert d'électrons et de noyaux entre plusieurs entités chimiques, etc.) se comprennent alors comme une recherche de configurations électroniques possédant une énergie minimale.

Qu'en est-il du noyau atomique ? Là encore, la physique moderne en donne une image très éloignée de la simple sphère. Le noyau devient un

monde à part, gouverné par trois des quatre forces fondamentales de la nature : les forces dites forte et faible se manifestant aux échelles subatomiques et la force électromagnétique. Ses habitants sont les nucléons (protons et neutrons), eux-mêmes constitués de quarks et de gluons. Comme pour les électrons, les nucléons se délocalisent au sein d'orbitales. Les propriétés nucléaires s'expliquent par les configurations adoptées par les nucléons et par le principe de recherche d'un état d'énergie minimale. Toutefois, les équations décrivant ces configurations sont bien plus difficiles à résoudre que leurs homologues électroniques. Elles donnent lieu à une phénoménologie nucléaire extrêmement riche et diversifiée **3**. En conséquence, l'identification des configurations nucléoniques possibles et des différentes voies par lesquelles un ensemble de nucléons parvient à atteindre un état d'énergie minimale reste une question ouverte. Et pourtant, cette information est importante pour les besoins du CEA – DAM. Elle contribue en effet à nourrir les bases de données sur lesquelles reposent les applications civiles et militaires du CEA ou, sur un plan plus académique, participe à la compréhension de la formation d'éléments lourds dans les environnements stellaires.

Le raffinement des descriptions théoriques du noyau mené par la collaboration, soutenu par les capacités numériques offertes par les supercalculateurs du CEA – DAM, a récemment permis de progresser dans l'identification des modes possibles de désexcitation nucléaire **1**. En traitant le noyau dans un cadre conceptuel unissant la mécanique quantique et la relativité restreinte **4**, la collaboration a calculé des millions de configurations accessibles aux nucléons en interaction. Certaines configurations voient la totalité des nucléons s'arranger en un seul noyau. D'autres correspondent à des nucléons distribués en plusieurs noyaux. Un noyau sera qualifié d'instable si ses nucléons présentent une configuration fragmentée de plus basse énergie que celle en un seul noyau et si la mécanique quantique autorise la transition entre ces deux configurations. On parle alors d'une désintégration radioactive, au cours de laquelle un noyau instable émet spontanément un ou plusieurs fragments.



Diverses radioactivités se distinguent par la nature des fragments émis. La radioactivité alpha correspond à l'émission d'une particule alpha, c'est-à-dire d'un noyau d'hélium 4, par un noyau instable. La radioactivité d'ions lourds se distingue par une émission d'un noyau possédant typiquement 12 à 34 nucléons. La scission d'un noyau instable en deux fragments, chacun constitué de 70 à 190 nucléons, est connue sous le nom de fission nucléaire. C'est ce mécanisme qui est utilisé pour la production d'énergie dans les centrales nucléaires. La collaboration entre le CEA – DAM et l'IJCLab a découvert une nouvelle configuration quantique dans laquelle les nucléons s'arrangent en trois fragments : un noyau lourd (possédant environ 200 nucléons) et deux particules alpha (**figure 1**). La transition depuis un noyau instable vers un tel état correspond à une nouvelle forme de désintégration nommée radioactivité double alpha.

L'existence de la radioactivité double alpha doit à présent être confirmée par une mise en évidence expérimentale... pour autant que ce processus soit détectable. En effet, un noyau instable a généralement le choix entre plusieurs processus pour retrouver une configuration stable, chacun pouvant se réaliser selon une probabilité donnée. La probabilité qu'un noyau instable se désintègre par radioactivité double alpha plutôt que par une autre voie autorisée doit alors être suffisamment grande pour que les détecteurs y soient sensibles. La collaboration a identifié plusieurs noyaux candidats pour lesquels cette probabilité est compatible avec les capacités actuelles de détection. Plusieurs équipes dans le monde se sont ainsi lancées à la recherche de la radioactivité double alpha dont l'existence, si elle est confirmée, viendra consolider la compréhension fondamentale que les chercheurs ont du noyau de l'atome.

RÉFÉRENCES

- 1** F. Mercier, J. Zhao, J.-P. Ebran, E. Khan, T. Nikšić, D. Vretnar, « Microscopic description of 2- α decay in ^{212}Po and ^{224}Ra isotopes », *Physical Review Letters*, **127**, 012501 (2021).
- 2** R. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*, volume I, chapter 1 : « Atoms in motion », *Basic Books* (2015).
- 3** J.-P. Ebran, E. Khan, T. Nikšić, D. Vretnar, « How atomic nuclei cluster », *Nature*, **487**, p. 341-344 (2012).
- 4** J.-P. Ebran, « Covariant energy density functionals », *Energy Functional Methods for Atomic Nuclei*, IOP Publishing (2019).

M. Dupuis [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire matière en conditions extrêmes (LMCE), Bruyères-le-Châtel]
M. Kerveno [Institut pluridisciplinaire Hubert-Curien (IPHC), UMR 7178 CNRS – Université de Strasbourg]
T. Kawano [Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, Nouveau Mexique, États-Unis]

Lumière sur un noyau d'atome chamboulé par un neutron

Lorsqu'on projette un neutron sur un noyau atomique, les rayons gamma qui sont émis mettent en lumière certaines propriétés de la collision. Cette collision est le siège de multiples événements au sein du noyau qui sont décrits par les physiciens pour simuler le fonctionnement des réacteurs nucléaires producteurs d'électricité, l'explosion d'une étoile en supernova ou encore pour répondre au programme Simulation du CEA – DAM. Une mesure récente d'un des rayons gamma a révélé un défaut dans la théorie communément admise : proposée par le CEA – DAM et le Los Alamos National Laboratory aux États-Unis, la solution est venue d'un modèle physique qui prend mieux en compte la phase rapide de la collision entre le neutron et les constituants du noyau **1**.

en cascade pour retrouver ses esprits. Les physiciens s'efforcent de reconstituer le scénario de cette collision et de comprendre comment le noyau s'en remet.

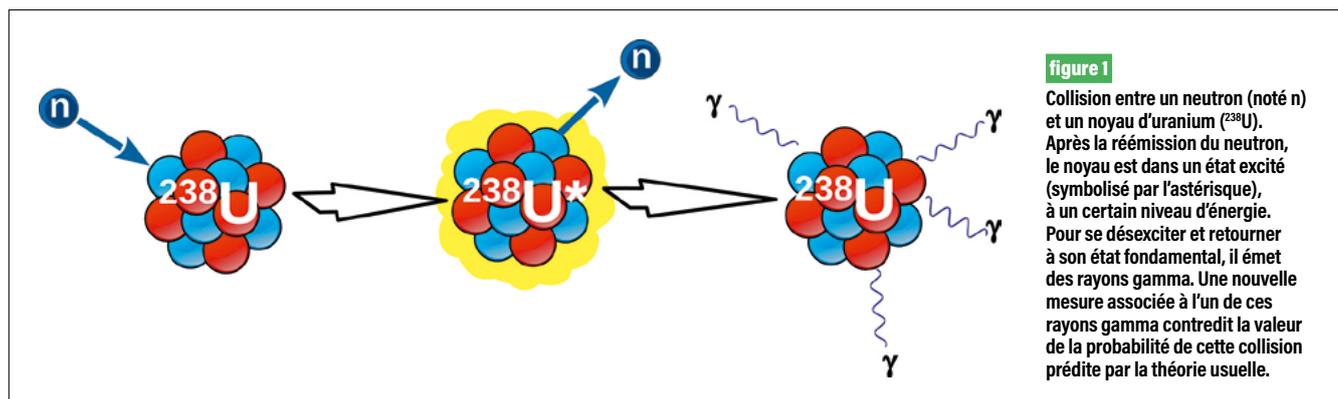
Une surprise expérimentale

Une nouvelle expérience, conçue par une équipe strasbourgeoise de l'Institut pluridisciplinaire Hubert-Curien (IPHC) et réalisée auprès de l'accélérateur de particules Gelina à Geel en Belgique, a permis d'étudier la collision entre un neutron et un noyau d'uranium en mesurant les probabilités d'émission des rayons gamma émis par l'uranium **1**. Un résultat a retenu l'attention des physiciens : pour certains rayons gamma, les mesures sont dix fois plus faibles que les valeurs obtenues par les calculs théoriques. Et comme la mesure fait foi, il revenait aux théoriciens d'expliquer cette différence, ce qu'ont fait ceux du CEA – DAM et du Los Alamos National Laboratory.

Dans un réacteur nucléaire ou une étoile en explosion, des neutrons sont émis en permanence et bousculent les noyaux présents dans cette fournaise, notamment des noyaux d'uranium. Le voyage de chaque neutron est une épopée (**figure 1**), dans laquelle le neutron peut transférer une partie de son énergie au noyau et repartir pour de nouvelles aventures. Suite à la bousculade, le noyau, entité très résiliente, émet des rayons gamma

Un noyau secoué

Au début du scénario, le neutron percute le noyau. Celui-ci absorbe une partie de l'énergie du neutron : on dit qu'il s'excite, il passe de son niveau dit fondamental, son état de repos, à un niveau d'énergie supérieure, dit état excité. En effet, le noyau est un système quantique qui possède des niveaux d'énergie. Ils sont représentés par les lignes horizontales sur la **figure 2a**, de plus en plus serrées à mesure que l'énergie augmente et vont jusqu'à former un



continuum dans lequel les niveaux individuels ne se distinguent plus. De plus, chacun des niveaux possède une propriété particulière : son moment angulaire intrinsèque, appelé aussi spin. Le spin est une grandeur purement quantique sans équivalent en physique classique, mais parfois visualisée comme un mouvement de rotation interne du noyau. La collision transfère au noyau une quantité de moment angulaire : de là à dire qu'il a la tête qui tourne, il n'y a qu'un pas.

Dans la suite du scénario, le noyau d'uranium excité libère l'énergie gagnée lors de la collision sous la forme d'une cascade de rayons gamma (figure 2b). Chaque rayon gamma correspond à une transition entre deux niveaux d'énergie : le noyau se relaxe progressivement et

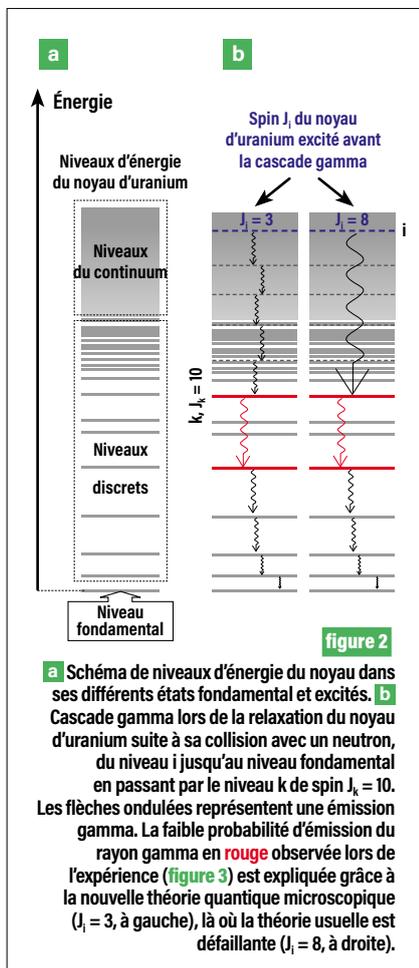


figure 2

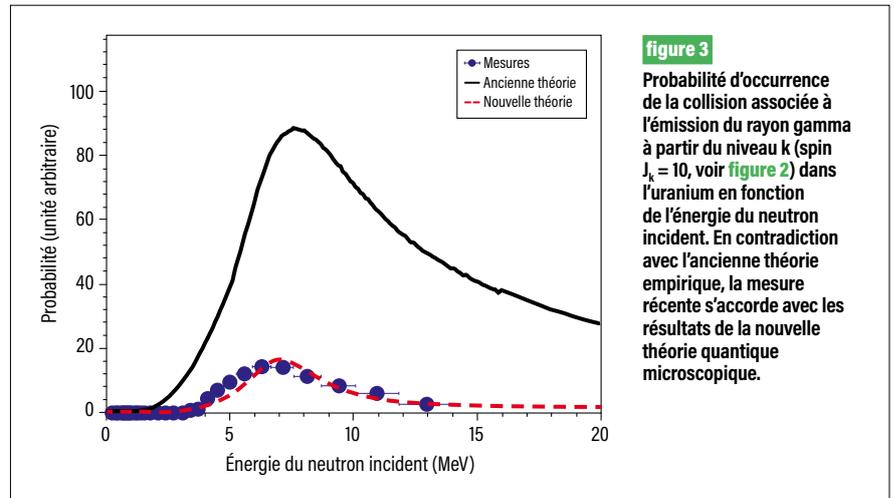


figure 3

descend les niveaux jusqu'à son niveau fondamental. De plus, la probabilité qu'une transition entre deux niveaux se produise dépend fortement de la différence de spin entre ces deux niveaux : plus cette différence est faible et plus la probabilité de transition est grande.

Un des résultats expérimentaux, reporté sur la figure 3, concerne un rayon gamma particulier au sein de la cascade (flèche rouge sur la figure 2b) qui est émis à partir d'un niveau excité (noté k) de spin égal à 10. Si le spin du niveau initial (noté i sur la figure) est proche de 10, alors il y a de fortes chances que la cascade passe par le niveau k (droite de la figure). Au contraire, si le niveau i a un spin plus faible, alors atteindre le niveau k devient laborieux, car la différence de spin entre ces niveaux est très forte (gauche de la figure 2b) : la relaxation procède alors en plusieurs étapes intermédiaires, mais ce chemin, plus alambiqué, est bien moins probable.

L'approche théorique usuelle est basée sur une description empirique du transfert de moment angulaire qui ne prenait pas en compte un aspect important de la dynamique de la réaction. Cette approche prédisait pour le niveau initial i une valeur moyenne de spin de 8. Dans ce cas, les transitions vers le niveau k sont facilitées et la probabilité de transition devrait être élevée. Mais ce résultat escompté est en contradiction avec la mesure d'une faible probabilité pour cette transition. Une nouvelle théorie décrit de manière plus réaliste la

phase rapide de la collision grâce à une approche quantique microscopique. Elle favorise de faibles transferts de spin, à partir des interactions entre le neutron incident et les protons et neutrons constituant le noyau [2]. Elle donne notamment des valeurs moyennes de spin pour le niveau i bien plus faibles qu'auparavant, de 3 ou 4. De cette manière, le niveau k est beaucoup moins alimenté et la prédiction théorique rejoint la mesure [1] (figure 3).

Ces études se poursuivent afin de mieux détailler le déroulement des collisions entre un neutron et un noyau. Elles rendent possible le raffinement de la simulation numérique pour les applications civile et militaire de la physique nucléaire, ainsi que pour l'étude de l'évolution d'une supernova.

RÉFÉRENCES

- 1 M. Kerveno, M. Dupuis, A. Bacquias, F. Belloni, D. Bernard, C. Borcea, M. Boromiza, R. Capote, C. De Saint Jean, P. Dessagne, J.-C. Drohe, G. Henning, S. Hilaire, T. Kawano, P. Leconte, N. Nankov, A. Negret, M. Nyman, A. Olacel, A. J. M. Plompen, P. Romain, C. Rouki, G. Rudolf, M. Stanoiu, R. Wynants, « Measurement of $^{238}\text{U}(n, n\gamma)$ cross section data and their impact on reaction models », *Physical Review C*, **104**, 044605 (2021).
- 2 M. Dupuis, S. Hilaire, S. Péru, É. Bauge, M. Kerveno, P. Dessagne, G. Henning, « Microscopic modeling of direct pre-equilibrium emission from neutron induced reactions on even and odd actinides », *Proc. Intern. Conf. Nuclear Data for Science and Technology*, (ND2016), Bruges, Belgium, 11-16 septembre 2016, éd. A. Plompen *et al.*, p. 12019 (2017).

S. Brygoo [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France]

P. Loubeyre [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France]

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

M. Millot, P. Celliers, J. Eggert [Lawrence Livermore National Laboratory, Californie, États-Unis]

J. R. Rygg, G. Collins [Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, New York, États-Unis]

R. Jeanloz [University of California, Berkeley, Californie, États-Unis]

Jupiter : une planète géante recréée en laboratoire

Jupiter, la plus grosse planète du système solaire, est constituée principalement d'un mélange d'hydrogène et d'hélium. Une question très débattue parmi les chercheurs est de savoir si la composition de ce mélange gazeux reste la même de la surface jusqu'au centre de la planète. Grâce à des expériences de mise sous très haute pression d'un mélange gazeux d'hydrogène et d'hélium, un travail de collaboration entre le CEA – DAM et des laboratoires américains a montré qu'une zone dans laquelle les deux gaz se séparent devrait exister et s'étendre sur 15 % du rayon de la planète **1**. Ce résultat permet, d'une part, de contraindre les modèles des intérieurs planétaires et d'interpréter plusieurs observations des missions spatiales comme *Galileo* et *Juno* et, d'autre part, de connaître le comportement de ce gaz à des pressions extrêmes pertinentes pour les besoins du CEA – DAM.

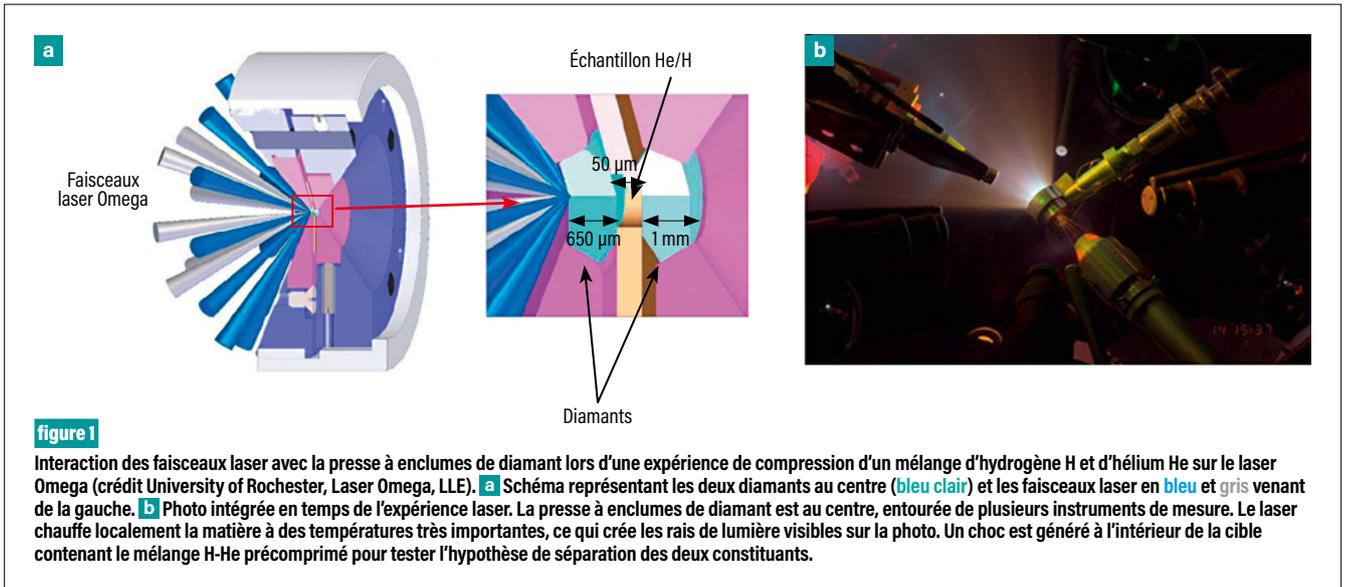
Dans les années 1970, l'astrophysicien américain Edwin Salpeter émettait l'hypothèse que lorsqu'un mélange d'hydrogène et d'hélium est porté à une pression de plusieurs millions d'atmosphères, comme c'est le cas au cœur de Jupiter, et que l'hydrogène H devient métallique, ce dernier expulse tout l'hélium He, qui tombe alors en pluie vers le centre de la planète. L'existence de l'hydrogène métallique a été démontrée en 2020 par une équipe du CEA – DAM **2**.

La mesure du manque d'hélium dans l'atmosphère de Jupiter par la sonde *Galileo* en 1996 a ainsi été interprétée comme une conséquence directe de cette séparation H-He. Cependant, deux avancées récentes ont apporté des résultats contradictoires empêchant de confirmer l'hypothèse de Salpeter. D'une part, les calculs les plus avancés indiquent qu'une telle séparation entre l'hydrogène et l'hélium ne peut pas exister pour les conditions de pression, de température et de densité régnant à l'intérieur

de Jupiter. D'autre part, la mission spatiale *Juno* a mesuré en 2016 la distribution de masse à l'intérieur de la planète et a détecté une zone hétérogène s'étendant sur 15 % de son rayon, dont l'origine pourrait être la séparation de l'hydrogène et de l'hélium. Comme aucune sonde spatiale ne peut pénétrer assez profondément dans Jupiter, il était nécessaire de recréer le mélange gazeux de Jupiter en laboratoire afin de répondre définitivement à la question de la séparation H-He.

Pour atteindre les conditions rencontrées au cœur de Jupiter, une nouvelle technique expérimentale de compression a été mise au point. Le mélange est d'abord comprimé à quelques gigapascals (GPa), soit environ dix mille fois la pression atmosphérique, d'une manière dite statique grâce à une presse dite à enclumes de diamant (**figure 1a**), puis d'une manière dite dynamique jusqu'à quelques centaines de gigapascals, soit plusieurs millions de fois la pression atmosphérique, en générant une onde de choc à l'aide d'un laser de plusieurs kilojoules. Aucune de ces deux techniques ne pouvait seule reproduire ces conditions de pression avec une densité et une température représentatives des intérieurs planétaires. C'est l'enchaînement de la compression statique puis dynamique qui a permis de reproduire l'intérieur de Jupiter. La collaboration franco-américaine a tout d'abord appliqué cette nouvelle technique à l'hélium pur, puis à l'hydrogène pur, et enfin au mélange H-He.

L'expérience a été effectuée auprès du laser Oméga de l'université de Rochester aux États-Unis et son principe est illustré sur la **figure 1**. Le laser est focalisé sur la cible constituée de la presse à enclumes de diamant contenant le gaz à étudier précomprimé à environ 4 GPa. La vaporisation rapide du diamant par le laser engendre, par effet dit fusée, un choc qui se propage dans le gaz. Les appareils de mesure visibles sur la **figure 1b** permettent de déduire la vitesse du choc et la température du



plasma (gaz ionisé). En combinant ces valeurs avec des lois de conservation, on obtient sa pression. Enfin, un faisceau laser secondaire éclaire le plasma et sa réflexion sur celui-ci renseigne sur la quantité d'atomes ionisés et leur charge. L'ensemble des états de pression et température ainsi atteints par choc constitue la courbe dite d'Hugoniot.

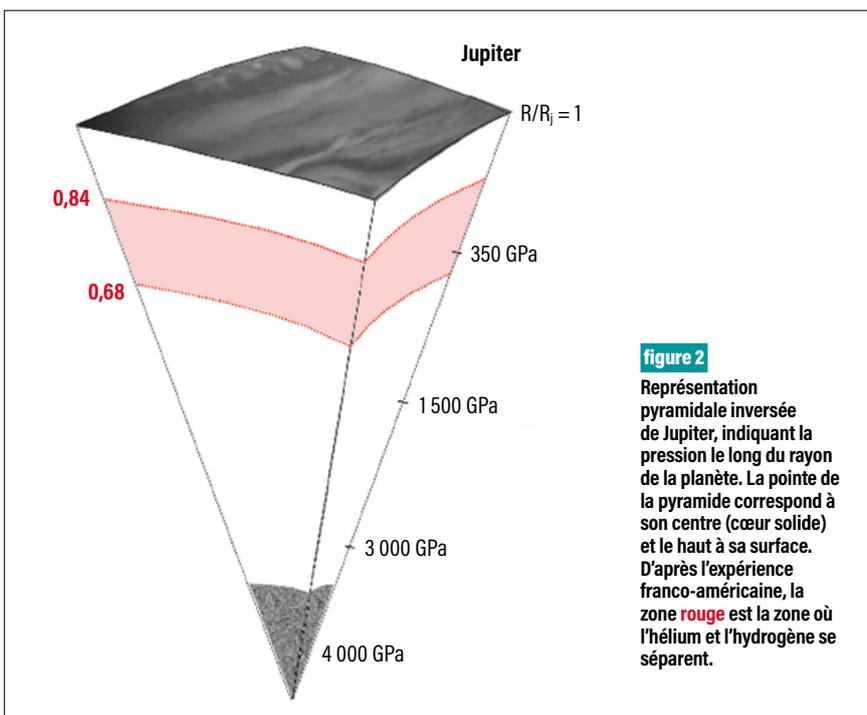
L'hélium seul reste complètement transparent en dessous de plusieurs centaines de gigapascals alors que

l'hydrogène seul, lui, devient métallique autour de 100 GPa avec une réflectivité importante. Mélangé de manière uniforme avec l'hélium, l'hydrogène est moins réfléchissant, car son caractère métallique est atténué par la présence d'hélium. Lorsque les deux éléments se séparent, la réflectivité du mélange est alors proche de celle de l'hydrogène qui n'est plus gêné par l'hélium.

Le long de la courbe d'Hugoniot du mélange H-He, des changements

brutaux de réflectivité ont été observés. En particulier, entre 90 et 120 GPa le long de la courbe, la réflectivité du mélange est égale à celle de l'hydrogène pur alors qu'elle est plus faible en dehors de cet intervalle. Ce changement de réflectivité est directement attribué à la séparation de l'hydrogène et de l'hélium; la courbe d'Hugoniot traverse ainsi une zone de séparation. Par comparaison avec les températures et pressions de Jupiter et par extrapolation en pression de la zone de séparation jusqu'à 350 GPa, on peut alors définir une zone à l'intérieur de la planète où le mélange n'est plus uniforme. Cette zone, représentée en rouge sur la **figure 2**, constitue un cinquième du volume de Jupiter.

Ces mesures sont les premières réalisées dans les conditions réelles des intérieurs de Jupiter. C'est en quelque sorte une mission spatiale sur terre. Ces études seront poursuivies avec de nouveaux mélanges, d'autres précompressions, y compris pour étudier d'autres intérieurs planétaires.



RÉFÉRENCES

- 1 S. Brygoo, P. Loubeyre, M. Millot, J. R. Rygg, P. M. Celliers, J. H. Eggert, R. Jeanloz, G. W. Collins, « Evidence of hydrogen-helium immiscibility at Jupiter-interior conditions », *Nature*, **593**, p. 517 (2021).
- 2 P. Loubeyre, F. Occelli, P. Dumas, « Première observation de l'hydrogène métallique », revue *chocs Avancées*, **15**, p. 22-23 (2021).

B. Jodar [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France
Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire matière en conditions extrêmes (LMCE), Bruyères-le-Châtel]
D. Hébert, B. Aubert, J.-L. Rullier, I. Bertron [CEA – DAM, Centre du Cesta]
E. Ando [Laboratoire Sols, solides, structures, risques (3SR),
UMR 5521 Université Grenoble-Alpes – CNRS – Grenoble INP]

Les petits débris, un gros coup de pouce pour dévier les astéroïdes

Une façon de dévier un astéroïde consiste à le percuter avec un projectile. Dans ce cas, à la poussée exercée par le projectile, il faut ajouter celle due à l'éjection de débris engendrés par la collision. Cette poussée supplémentaire est directement liée à la masse et à la vitesse des débris. Une équipe rassemblant le CEA – DAM et le laboratoire Sols, solides, structures, risques à Grenoble a récemment montré que les débris les plus rapides jouent le rôle prépondérant dans la déviation résultante **1**. Ce résultat va à l'encontre des résultats découlant d'un modèle idéalisé fréquemment utilisé à ce jour.

Que faire si un astéroïde menace d'entrer en collision avec la Terre ? Une possibilité pour le dévier est d'utiliser l'énergie cinétique d'un projectile propulsé dans sa direction à très grande vitesse, dit hypervéloc. Mais la poussée engendrée sur l'astéroïde par un tel impact est difficile à prévoir théoriquement, car les intenses ondes de choc qui l'accompagnent peuvent le fragmenter et conduire à la formation d'un cratère. L'éjection de nombreux débris se traduit alors par une poussée supplémentaire dans le même sens par effet dit fusée. Pour évaluer l'importance de la poussée due aux débris, une première expérience grandeur nature est prévue par l'Esa et la Nasa dans le cadre des missions spatiales *Hera* **2** et *Dart* **3** respectivement. La capacité à dévier des débris est aussi importante pour la protection des satellites vis-à-vis de débris spatiaux ou pour la protection des optiques de lasers de grande puissance, comme le Laser Mégajoule situé sur le centre CEA – DAM du Cesta **4**.

Impacts hypervéloces en laboratoire

D'autres expériences, à échelle réduite, ont pour but de mieux comprendre les mécanismes de fragmentation et d'éjection de débris lors de tels impacts.

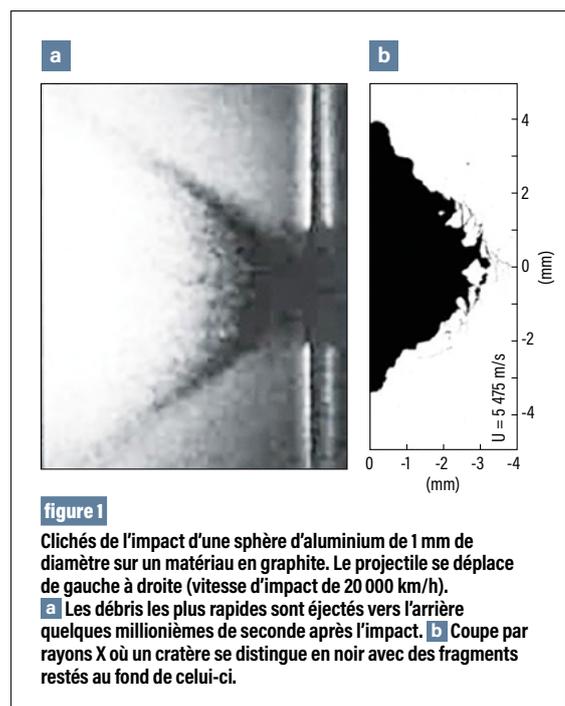


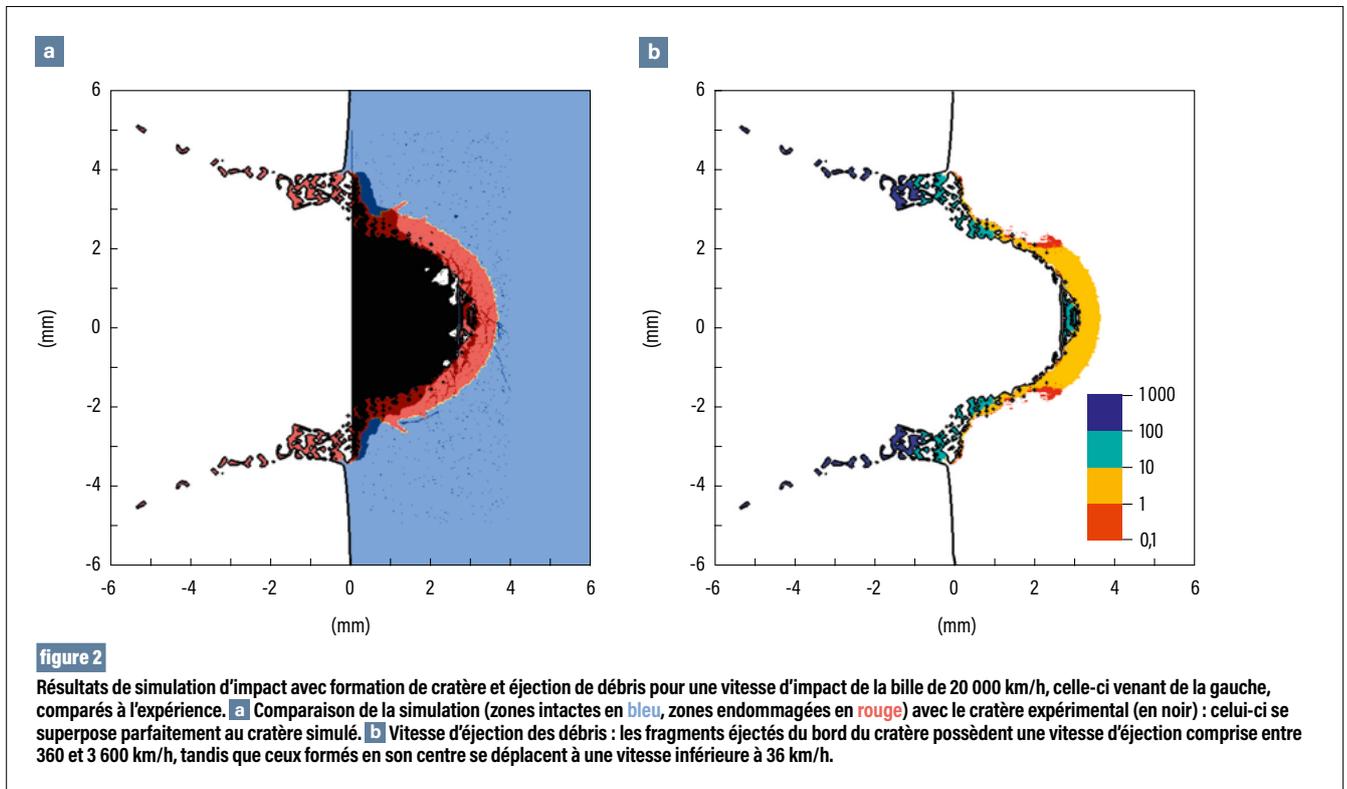
figure 1

Clichés de l'impact d'une sphère d'aluminium de 1 mm de diamètre sur un matériau en graphite. Le projectile se déplace de gauche à droite (vitesse d'impact de 20 000 km/h).

a Les débris les plus rapides sont éjectés vers l'arrière quelques millièmes de seconde après l'impact. **b** Coupe par rayons X où un cratère se distingue en noir avec des fragments restés au fond de celui-ci.

De récents travaux expérimentaux et numériques menés sur le centre CEA – DAM du Cesta ont ainsi mis en avant l'importance des débris de petite taille dont les vitesses atteignent le kilomètre par seconde, soit 3 600 km/h.

Le matériau retenu est un graphite comprenant 20 % de porosité et dont le comportement est proche de certaines roches. Le projectile est une bille en aluminium de 1 mm de diamètre et de vitesse d'impact s'étendant de 4 000 à 20 000 km/h. Une caméra rapide a permis d'observer l'éjection des débris lors de l'impact. Un exemple d'image prise



juste après l'impact est présenté sur la **figure 1a**. Bien que peu précises sur la taille des débris, ces images permettent néanmoins d'estimer la vitesse et l'angle d'éjection. Les cratères créés lors de la collision ont ensuite été analysés à l'aide d'une imagerie par rayons X pour observer le diamètre, la profondeur et la forme. Un exemple est présenté sur la **figure 1b**, où la présence d'une zone endommagée est constatée au fond du cratère.

Cratères et débris

Des simulations numériques élaborées de ces expériences ont permis de reproduire la plupart des observations expérimentales. La **figure 2a** illustre le bon accord sur les dimensions du cratère ainsi que sur les zones fragmentées (zones rouges dans la simulation). La **figure 2b** montre que la vitesse d'éjection des fragments dépend fortement de leur position, les plus rapides étant éjectés à la périphérie du cratère. Ceux formés au centre du cratère ont une vitesse beaucoup plus faible. De plus, des quantités physiques

non accessibles expérimentalement ont pu être déduites de ces simulations numériques, qui ont ainsi permis de calculer la poussée due aux débris. Dans le cas de l'impact à 20 000 km/h, ces derniers permettent quasiment de doubler l'effet du projectile seul. Si l'on analyse en détail la poussée due aux débris, il apparaît que la contribution majoritaire (85 %) est due aux débris les plus rapides, alors que ceux-ci ne représentent que 35 % de la masse éjectée. Ce résultat diffère sensiblement de celui déduit d'un modèle couramment utilisé dans la littérature, basé sur des lois de puissance, concluant que les débris les plus lents et les plus massifs contribuent le plus à la poussée **5**. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que ce modèle ne prend pas en compte convenablement les plus petites particules éjectées. Pour étayer cette conclusion, de futures expériences devraient conduire à la caractérisation fine des débris et, en particulier, à la mesure de la masse et de la vitesse des petites particules éjectées.

RÉFÉRENCES

- 1** B. Jodar, D. Hebert, B. Aubert, E. Andò, J.-L. Rullier, I. Bertron, « Impact into porous graphite: An investigation of crater formation and ejecta distribution », *International Journal of Impact Engineering*, **152**, p. 103842 (2021).
- 2** https://www.esa.int/Safety_Security/Hera
- 3** www.nasa.gov/planetarydefense/dart/dart-news
- 4** Y. Michel, *Phénomène d'impact à haute vitesse sur cibles minces fragiles - Application au projet de Laser Mégajoule et à la problématique des débris spatiaux*, thèse de doctorat soutenue le 16 février 2007 et délivrée par l'université Paul-Sabatier Toulouse III.
- 5** K. Holsapple, K. Housen, « Momentum transfer in asteroid impacts. I. Theory and scaling », *Icarus*, **221**, p. 875-887 (2012).

J.-L. Victor, C. Marcel [CEA – DAM, centre du Ripault]
L. Sauques [Centre d'expertise parisien de la Direction générale de l'armement, Paris]
N. Penin, A. Rougier [Institut de chimie de la matière condensée de Bordeaux (ICMCB),
UMR 5026 CNRS – Bordeaux INP – Université de Bordeaux]

Des films minces intelligents pour isoler du froid et de la chaleur

À l'heure du réchauffement climatique, la mise au point d'un vitrage isolant vis-à-vis de températures excessives aurait de nombreuses applications dans le secteur de l'habitat ou dans d'autres domaines, comme celui du camouflage d'émetteurs de chaleur tels que le corps humain ou le moteur d'un véhicule. Une solution existe, elle repose sur l'utilisation de couches minces de dioxyde de vanadium (VO_2) qui peuvent être déposées sur un vitrage. En collaboration avec la Direction générale de l'armement (DGA) et le CNRS, une équipe du CEA – DAM a mis au point un procédé innovant dont les contraintes sont compatibles avec un dépôt, non pas sur une nouvelle vitre, mais sur un film polymère souple dont peut facilement être revêtue une vitre déjà en place. Ce procédé ouvre la voie à une protection thermique performante des vitrages d'un bâtiment ou d'une habitation dans le cadre de la rénovation énergétique **1**.

À l'heure de la transition énergétique, la course aux matériaux isolants va bon train. Des fenêtres intelligentes protégeant de températures excessives contribueraient à conserver une température agréable dans les pièces d'une habitation, sans nécessiter de climatisation l'été ni de chauffage excessif l'hiver. Pour ses besoins propres, le CEA – DAM travaille aussi à l'élaboration de tels matériaux innovants.

En plus d'émettre de la lumière visible, le Soleil émet des rayons infrarouges responsables de la chaleur absorbée par le verre d'une vitre. Dès que celui-ci est chaud, il rayonne à son tour et chauffe le milieu qui l'environne. Pour une habitation, cet effet est néfaste aussi bien l'hiver que l'été : en effet, les vitres chauffées l'été par le Soleil font trop souvent augmenter la température intérieure, et ces mêmes

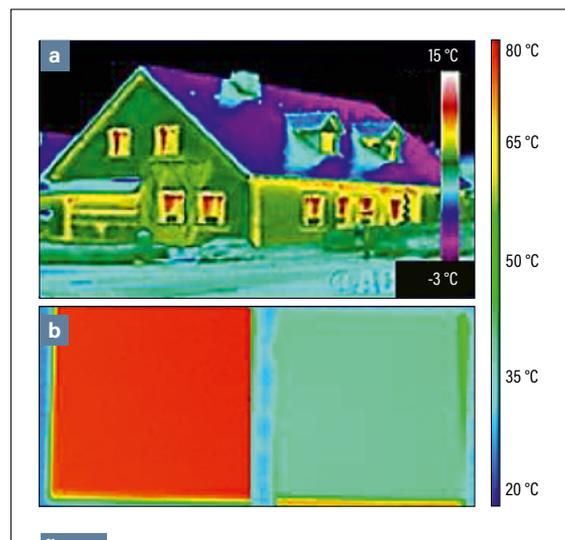


figure 1

a Fuites thermiques d'une habitation mesurées avec une caméra infrarouge : les points les plus chauds sont les vitres des fenêtres ; en effet, elles laissent s'échapper la chaleur provenant de l'intérieur. **b** Verre avec et sans couche mince de dioxyde de vanadium : à gauche, le carré rouge indique l'échauffement du verre à 80 °C sans protection ; à droite, le carré bleu-vert illustre la présence d'une couche mince de VO_2 en surface de ce verre, la température du verre ne dépassant pas 40 °C.

vitres chauffées l'hiver par le chauffage intérieur rayonnent vers l'extérieur, provoquant une déperdition de chaleur. Ces fuites énergétiques ont été détectées par imagerie thermique et sont représentées dans la partie supérieure de la **figure 1**. Les zones les plus froides apparaissent en bleu ou violet et les plus chaudes en rouge ; les fuites les plus importantes sont observées sur les fenêtres.

Des couches minces de dioxyde de vanadium (VO_2) sont capables d'assurer la fonction d'isolation d'un vitrage : dans la partie inférieure de la **figure 1**,

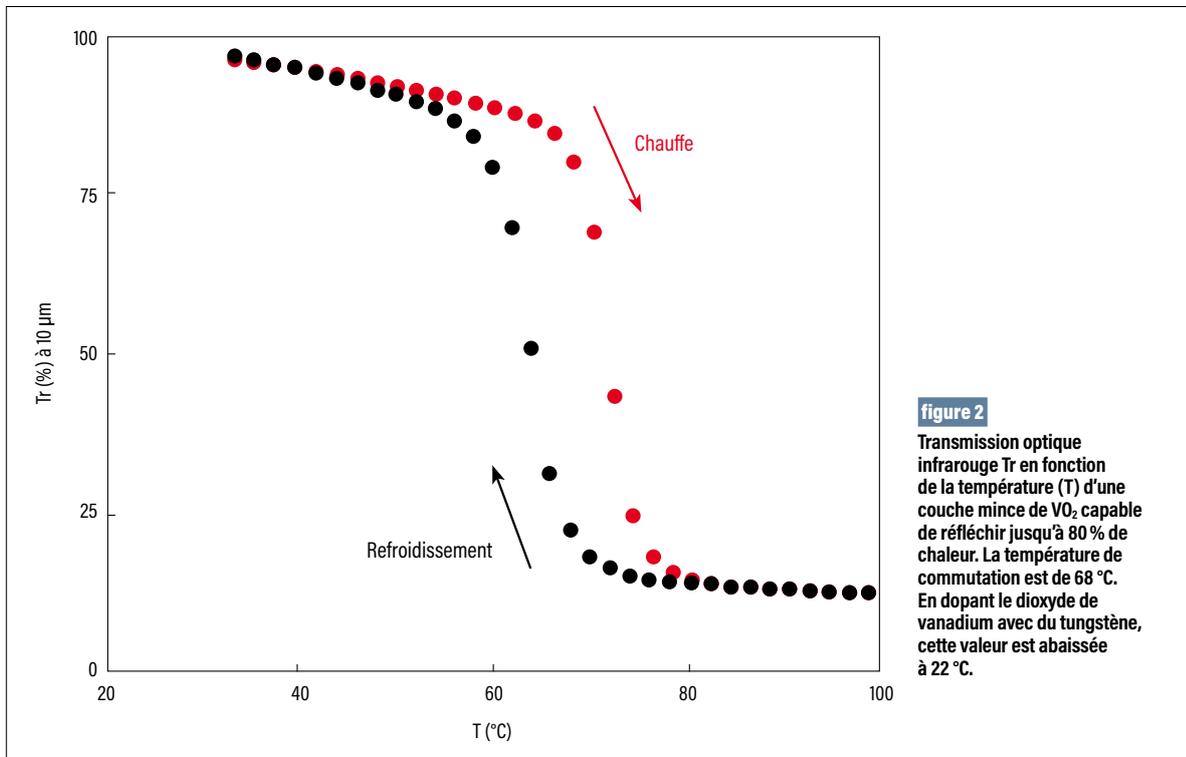


figure 2

Transmission optique infrarouge Tr en fonction de la température (T) d'une couche mince de VO_2 capable de réfléchir jusqu'à 80 % de chaleur. La température de commutation est de 68 °C. En dopant le dioxyde de vanadium avec du tungstène, cette valeur est abaissée à 22 °C.

le carré rouge à gauche représente un verre sans protection thermique exposé à une température extérieure de 80 °C tandis que le carré bleu-vert à droite correspond au même verre recouvert d'une couche mince de VO_2 . Comme cette couche empêche la chaleur de passer, la température du verre est diminuée d'un facteur deux **1**.

L'élaboration d'une couche mince de dioxyde de vanadium est un défi technologique. En effet, pour qu'elle n'altère pas la transmission de la lumière visible à travers la vitre, son épaisseur doit être de l'ordre du millième de celle d'un cheveu, soit 0,1 μm . Pour parvenir à cet objectif, un procédé a été mis au point au CEA – DAM. Grâce à une technique sous vide, il consiste à arracher d'une plaque métallique de vanadium (V) des paquets d'atomes et, après pulvérisation à haute énergie, à les mélanger avec de l'oxygène (O_2). Une couche dense de VO_2 est alors obtenue par génération de bouffées compactes de matière sur un substrat en verre porté à environ 1 000 volts par rapport à la plaque métallique. Après cuisson à 500 °C et refroidissement naturel jusqu'à la température ambiante, la couche mince

cristallise dans la phase cristallographique recherchée : en effet, pour que la couche de VO_2 ait les propriétés d'isolation recherchées, sa structure cristalline doit adopter cette phase que la cuisson permet d'obtenir.

Ce procédé permet de fabriquer des vitrages isolants neufs. Cependant, pour la rénovation énergétique, il est nécessaire de protéger des vitrages déjà en place. Pour cela, des films polymères souples semblent tout indiqués pour servir de substrat à la couche de VO_2 , car il suffirait alors de revêtir les vitrages en place d'un tel film. Cependant, les polymères ne supportent pas des températures supérieures à 300 °C, alors que la stabilisation de la phase cristallographique nécessitait plus de 450 °C.

En collaboration avec le CNRS et la DGA, une équipe du CEA – DAM a réussi à adapter le procédé pour que la température de cuisson ne dépasse pas 300 °C **1** et un dépôt a été réalisé sur un substrat en silicium. De plus, si la cuisson permet d'obtenir et de maintenir la structure cristallographique d'intérêt, celle-ci disparaît néanmoins au-dessous d'une température dite de commutation avoisinant 68 °C (figure 2). Pour

que la couche puisse remplir sa fonction de protection thermique autour d'une température de confort pour les personnes, cette température de commutation doit être abaissée autour de 22 °C. Cela est possible par dopage de l'oxyde de vanadium et a été réalisé par la même équipe par dopage avec du tungstène **2**.

Ces résultats offrent ainsi des perspectives pour le dépôt sur un substrat polymère souple **3**.

RÉFÉRENCES

- 1** J.-L. Victor, C. Marcel, L. Sauques, N. Penin, A. Rougier, « High quality thermochromic VO_2 thin films deposited at room temperature by balanced and unbalanced HiPIMS », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **227**, 111113 (2021).
- 2** J.-L. Victor *et al.*, « From multilayers to $V_{1-x}W_xO_{2+x}$ films elaborated by magnetron sputtering for decreasing thermochromic transition temperature », *Journal of Alloys and Compounds*, **858**, 157658 (2021).
- 3** S. Loquai, B. Baloukas, O. Zabeida, J. E. Klemberg-Sapieha, L. Martinu, « HiPIMS-deposited thermochromic VO_2 films on polymeric substrates », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **155**, p. 60-69 (2016).

A. Stathopoulos [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France]**L. Bergé** [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France]

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

S. Skupin [Institut lumière matière (ILM), UMR 5306 CNRS – Université Claude-Bernard Lyon I, Lyon]

Des ondes térahertz pour détecter des explosifs à distance

La détection à distance de matières dangereuses, comme les explosifs, incite à développer de nouvelles technologies comme celle exploitant un domaine en fréquence peu exploré : les ondes térahertz (THz). Celles-ci sont émises lors de l'ionisation de l'air ambiant par un laser ultrabref. Néanmoins, il n'est pas facile de disposer d'une énergie de rayonnement térahertz suffisante pour atteindre à distance et irradier efficacement les matériaux à identifier. En combinant deux techniques existantes, le CEA – DAM et l'Institut lumière matière de Lyon ont montré que la génération de rayonnement térahertz peut être augmentée à des niveaux record avec un rendement multiplié par dix **1**.

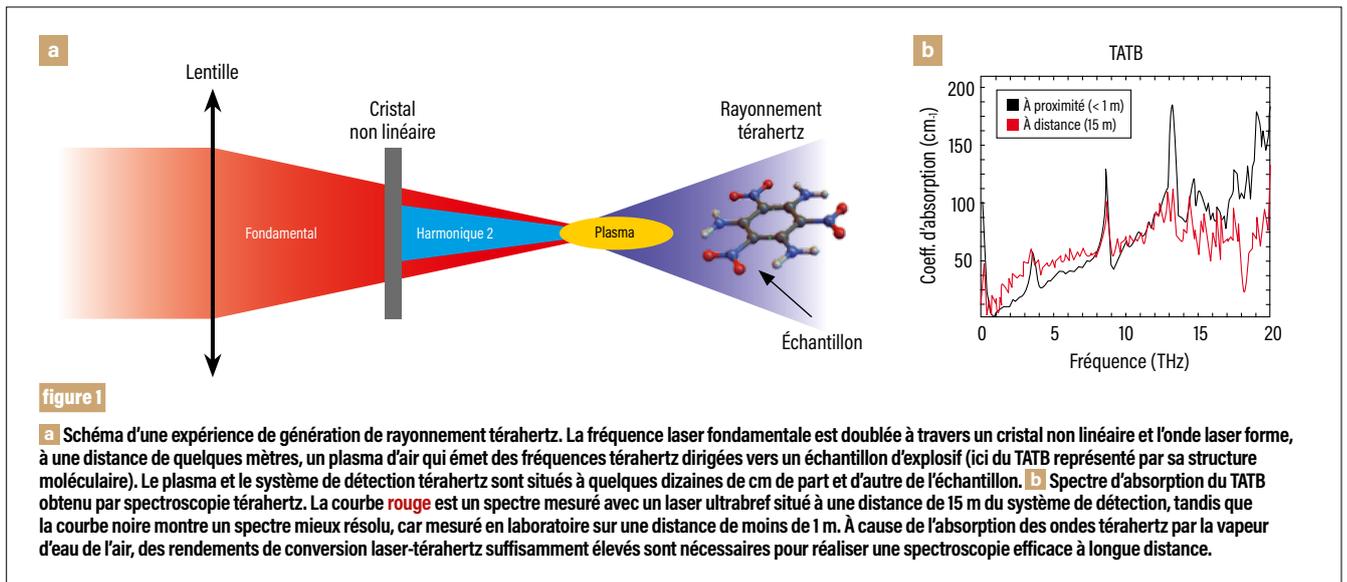
La détection d'explosifs à distance représente un enjeu important pour la sécurité nationale. Les ondes térahertz (THz), situées dans l'infrarouge lointain, ont la capacité d'être absorbées par de nombreux types de molécules complexes. Leur usage est donc tout indiqué pour mesurer par spectroscopie les excitations caractéristiques (rotations, vibrations) de molécules d'explosif.

À cette fin, un rayonnement térahertz intense, à large bande spectrale et généré à des rendements suffisants est requis pour, d'une part, collecter le plus de signatures spectrales possible et, d'autre part, pouvoir propager ce rayonnement sur des distances étendues sans qu'il soit totalement absorbé par la vapeur d'eau présente dans l'air. Augmenter ces rendements à des niveaux permettant de réaliser une spectroscopie térahertz fonctionnelle au-delà de dix mètres est le sujet principal du projet franco-européen Altesse 2 (*Air Laser-based Terahertz Spectroscopy of Explosives*), qui réunit le CEA – DAM, l'Institut lumière matière de Lyon, l'université technique du Danemark, l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis et les industriels français Amplitude et Imagine Optic.

La méthode de production d'ondes térahertz employée au cours de ce projet améliore un procédé dont la faisabilité a été démontrée antérieurement **2**. Celui-ci consiste à focaliser dans l'air ambiant une impulsion laser composée de sa fréquence fondamentale et de son harmonique deux pour ioniser le milieu et former un plasma émettant du rayonnement térahertz (**figure 1a**). Ces ondes térahertz sont ensuite focalisées sur un explosif comme le TATB, dont on analyse à distance par spectroscopie le rayonnement transmis (**figure 1b**). Or, les rendements de conversion laser-térahertz (fraction d'énergie laser convertie en énergie térahertz) excèdent rarement 0,1 %. Aussi, l'objectif du présent travail est-il de maximiser ce rendement en jouant sur les paramètres laser disponibles.

Il existe deux méthodes permettant d'améliorer la production d'impulsions térahertz par un plasma d'air, qui reposent sur l'accroissement de la vitesse et de la densité des électrons ionisés au passage de l'onde laser. La première consiste à ajouter judicieusement des fréquences harmoniques – ou « couleurs » – au laser **3**. La deuxième vise à modifier la polarisation du champ laser, c'est-à-dire la direction de vibration de l'onde optique (**figure 2a**). Par exemple, un laser constitué de deux couleurs, préparées en polarisation circulaire et tournant dans le même sens, augmente le rendement térahertz d'un facteur 4 à 6 par rapport à une polarisation linéaire à deux couleurs parallèles **4**.

Pour accroître davantage le rendement térahertz, l'idée est de combiner ces deux techniques. L'étude **1** a ainsi comparé l'effet de la polarisation laser sur l'énergie térahertz produite par un laser contenant de deux à dix couleurs à l'aide d'un modèle simplifié **3**, qui évalue rapidement l'efficacité de l'ionisation et la vitesse des électrons accélérés dans le champ laser. Avec deux couleurs, la polarisation circulaire conduit à un



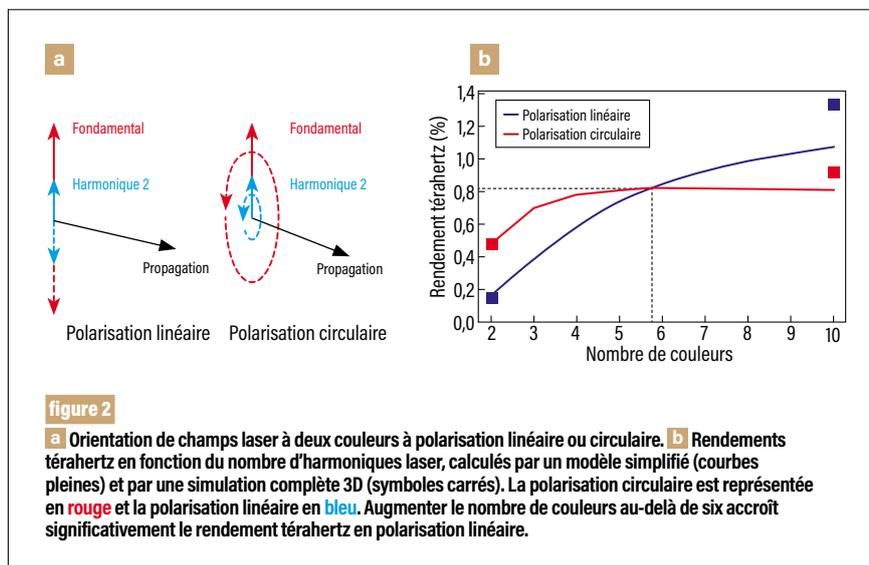
rendement plus élevé qu'avec une polarisation linéaire. Étonnamment, on observe un résultat opposé pour un nombre de couleurs supérieur à 6 (**figure 2b**): un champ laser à dix couleurs polarisé circulairement devient moins efficace que le même champ polarisé linéairement, car ce dernier augmente la vitesse des électrons aux instants d'ionisation, ce qui accroît son rendement térahertz.

Ces résultats ont été confirmés par des simulations 3D réalisées sur les supercalculateurs du Très Grand Centre de calcul (TGCC), situé sur le centre CEA – DAM

Île-de-France, et qui décrivent la totalité des phénomènes optiques et plasma affectant la propagation laser. Les carrés de la **figure 2b**, rapportant les résultats de ces calculs, montrent bien que la polarisation circulaire est plus efficace avec deux couleurs, mais que la polarisation linéaire prend le dessus à 10 couleurs, jusqu'à délivrer des rendements supérieurs à 1 %.

Des propriétés analogues ont été obtenues pour des gaz nobles (argon, hélium) à la place de l'air. La production d'ondes laser comportant plus de deux couleurs reste un défi expérimental. De premiers

tests utilisant trois harmoniques laser réalisés à l'université technique du Danemark montrent une augmentation significative en rendement par rapport à des lasers bicolores.



RÉFÉRENCES

- 1** A. Stathopoulos, S. Skupin, L. Bergé, « Terahertz pulse generation by multi-color laser fields with linear versus circular polarization », *Optics Letters*, **46**, 5906 (2021).
- 2** L. Bergé, K. Kaltenecker, S. Engelbrecht, A. Nguyen, S. Skupin, L. Merlat, B. Fischer, B. Zhou, I. Thiele, P. U. Jepsen, « Terahertz spectroscopy from air plasmas created by two-color femtosecond laser pulses: The ALTESE project », *Europhysics Letters*, **126**, 24001 (2019).
- 3** P. González De Alaiza Martínez, L. Bergé, I. Babushkin, U. Morgner, S. Skupin, E. Cabrera-Granado, C. Köhler, A. Husakou, J. Herrmann, « Boosting terahertz generation in laser-field ionized gases using a sawtooth wave shape », *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 183901 (2015); « Rayonnement térahertz généré par des lasers en dents de scie », revue *chocs Avancées*, **10**, p. 6-7 (2016).
- 4** C. Tailliez, A. Stathopoulos, S. Skupin, D. Buožius, I. Babushkin, V. Vaičaitis, L. Bergé, « Terahertz pulse generation by two-color laser fields with circular polarization », *New J. Phys.*, **22**, 103038 (2020).

A. Denœud, S. Brygoo [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France]
A. Sollier, L. Videau [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France
 Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire matière en conditions extrêmes (LMCE), Bruyères-le-Châtel]
A. Benuzzi-Mounaix, T. Vinci, A. Ravasio, A. Berlioux, J. Houy [Laboratoire pour l'utilisation
 des lasers intenses (Luli), UMR 7605 CNRS – CEA – École polytechnique – Sorbonne Université, Palaiseau]
J.-A. Hernandez [European synchrotron radiation facility (ESRF), Grenoble]
E. Brambrink [European X-ray free-electron laser (European Xfel), Hambourg, Allemagne]

Un nouvel outil pour explorer la matière ultracomprimée par laser

Les lasers de grande énergie permettent aujourd'hui de comprimer des matériaux solides à des pressions encore jamais atteintes. Lors d'une telle compression, de nouvelles phases solides peuvent être créées. Pour étudier la structure microscopique de ces matériaux comprimés, que l'on peut retrouver en particulier au cœur des planètes, la technique de diffraction X est la mieux adaptée. Le CEA – DAM, en collaboration avec l'équipe Phydell du laboratoire Luli, a mis au point avec succès un nouveau diffractomètre sur l'installation laser Luli2000 à Palaiseau [1](#). Un diffractomètre basé sur le même principe sera installé prochainement sur le Laser Mégajoule, situé sur le centre CEA – DAM du Cesta, près de Bordeaux.

Dans une planète, la force de gravité soumet la matière à une pression d'autant plus grande qu'elle est loin de la surface et proche du centre. C'est pourquoi les planétologues s'intéressent à la matière soumise à de très fortes pressions. Pour caractériser la matière dans ces conditions de pression, une approche consiste à réaliser des expériences de compression par laser, dans lesquelles des solides et des liquides sont comprimés de quelques gigapascals (GPa) à plusieurs térapascals (TPa), soit de plusieurs dizaines de milliers à plusieurs dizaines de millions de fois la pression atmosphérique. Ces expériences permettent d'étudier leurs propriétés physiques et, *in fine*, d'élaborer un modèle décrivant la structure de la planète, comme celle des super-Terres (voir p. 16-17). En outre, la comparaison des quantités mesurées à celles déduites de modèles théoriques permet d'enrichir la connaissance de l'évolution des structures atomiques utilisée au CEA – DAM.

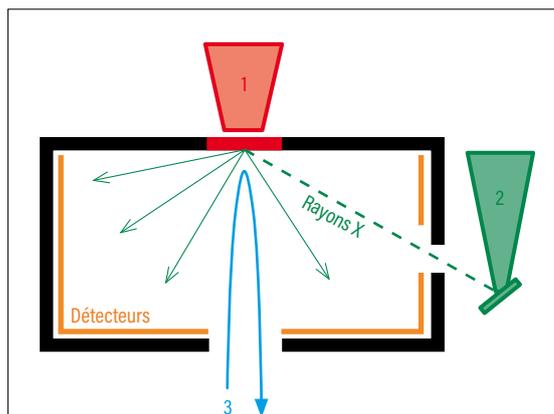


figure 1

Vue de dessus du diffractomètre, constitué d'un boîtier sur lequel est inséré l'échantillon d'intérêt (en rouge). Ce dernier est fortement comprimé par un laser kilojoule (1). Un rayonnement X bref et intense (trait tireté vert) est produit par l'interaction d'un autre laser kilojoule (2) avec un matériau annexe (parallélépipède vert). Il entre dans le boîtier au travers d'un collimateur et se diffracte sur l'échantillon, dont la montée en pression est mesurée à l'aide d'un capteur optique (3). La figure de diffraction est alors enregistrée au moyen de détecteurs placés sur les parois internes du boîtier (figure 2).

Cependant, les échelles de temps très courtes de ces phénomènes, de quelques centaines de picosecondes à quelques microsecondes, ont longtemps été un défi au développement des méthodes de mesure de structure atomique. Aujourd'hui, l'obstacle est levé, car la technique de diffraction X peut être utilisée avec un rayonnement X bref et intense. Cette technique permet d'avoir accès directement aux réarrangements atomiques dans les solides ou liquides comprimés sans nécessiter de calculs complexes pour interpréter la mesure. Il

est alors possible d'identifier la nature et la densité des différentes phases du solide ainsi que son éventuel passage en phase liquide, ou encore d'étudier la cinétique des différentes transitions de phase.

Un nouveau type de diffractomètre

Les expériences de diffraction X de matériaux comprimés sont classiquement réalisées au moyen de rayonnement X produit par un synchrotron ou un laser à électrons libres. Cependant, la compression associée, réalisée au moyen d'enclumes ou de lasers à énergie modeste, est limitée. Pour atteindre des pressions jusqu'au térapascal, l'utilisation d'un laser de grande énergie est nécessaire, de l'ordre du kilojoule au

minimum ; dans ce cas, un diffractomètre doit être mis au point et installé sur le laser de grande énergie [2,3](#). La [figure 1](#) fournit un schéma de principe d'un tel diffractomètre, mis au point et installé sur le laser Luli2000. L'un des deux faisceaux de ce laser est utilisé pour comprimer un matériau et l'autre pour créer le rayonnement X.

Le principal enjeu de ce type d'expérience réside dans la capacité du diffractomètre à observer le signal diffracté dans un bruit de fond parasite très intense généré lors de l'interaction des faisceaux laser avec les différents matériaux. C'est pourquoi l'un des défis de ce travail a été de protéger efficacement les détecteurs contre les rayons parasites par ce qu'on appelle un blindage.

Des rayons X créés par la source située à l'extérieur du boîtier éclairent l'échantillon comprimé et sont diffractés par ce dernier dans des directions caractéristiques des distances interatomiques rencontrées. Ils sont alors enregistrés par les détecteurs qui tapissent les parois internes du boîtier. La [figure 2](#) représente un éclaté de ce boîtier où se distingue le signal X diffracté (arcs de cercle sombres) enregistré par les cinq détecteurs.

Couplé à un capteur optique mesurant la pression et la température d'un échantillon de fer comprimé, ce dispositif a permis d'identifier les différentes phases solides du fer choqué au-delà de 200 GPa et jusqu'à sa fusion.

Ce diffractomètre sera utilisé prochainement pour étudier la fusion sous choc d'un grand nombre de métaux de transition, et sera adapté sur le Laser Mégajoule pour étudier la structure de matériaux à des pressions supérieures au térapascal, pression que l'on peut retrouver à l'intérieur de super-Terres.

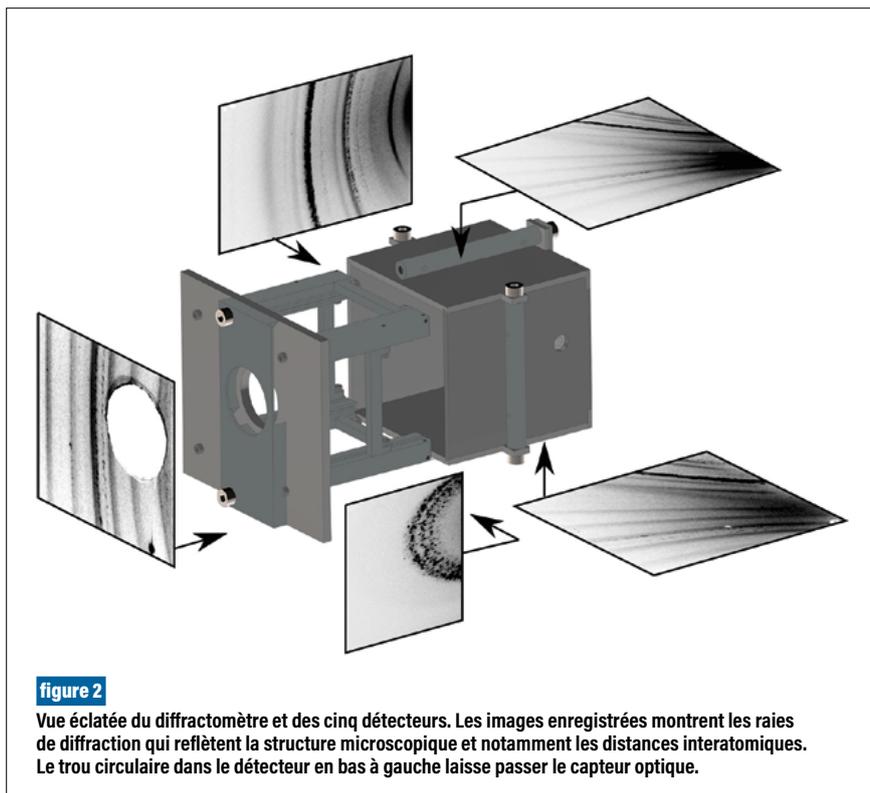


figure 2

Vue éclatée du diffractomètre et des cinq détecteurs. Les images enregistrées montrent les raies de diffraction qui reflètent la structure microscopique et notamment les distances interatomiques. Le trou circulaire dans le détecteur en bas à gauche laisse passer le capteur optique.

RÉFÉRENCES

- 1** A. Dencœud *et al.*, « X-ray powder diffraction in reflection geometry on multi-beam kJ-type laser facilities », *The Review of Scientific Instruments*, **92**, 013902 (2021).
- 2** J. R. Rygg *et al.*, « Powder diffraction from solids in the terapascal regime », *The Review of Scientific Instruments*, **83**, 113904 (2012).
- 3** J. R. Rygg *et al.*, « X-ray diffraction at the National Ignition Facility », *The Review of Scientific Instruments*, **91**, 043902 (2020).

A. Laffont, J.-P. Adam [CEA – DAM, centre de Gramat]

O. Pascal [Laboratoire plasma et conversion d'énergie (Laplace), UMR 5213 CNRS – Université Paul-Sabatier Toulouse III – Institut national polytechnique de Toulouse]

R. Pascaud [Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (ISAE-Supaéro), Toulouse]

Un plasma pour une antenne miniature et agile en fréquence

Une antenne est une passerelle entre une onde électromagnétique et un circuit électronique dans un système de communication ou de détection. Toute technologie permettant de réduire leur taille revêt un intérêt pour les applications civiles et militaires. En collaboration avec le Laboratoire plasma et conversion d'énergie (Laplace) et l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (ISAE-Supaéro) à Toulouse, le CEA – DAM a étudié une antenne dite à plasma : trois fois plus petite que la plus petite des antennes classiques, elle semble être une solution prometteuse. Pour mieux comprendre son fonctionnement, la collaboration a développé un modèle qui se révèle un outil décisif pour le design et l'optimisation de l'antenne **1**. De plus, cette antenne a l'avantage de résister aux agressions électromagnétiques visant à détruire des composants électroniques du circuit.

Il existe une multitude d'antennes autour de nous, elles sont visibles (parabole satellite, télévision, TNT, radio FM, etc.) ou plus discrètes (smartphone, wifi, etc.). Généralement, le point commun de ces antennes est un élément métallique (tige, grille, plaque) dont la taille est voisine de la longueur d'onde des ondes électromagnétiques transmises. Les ondes radio à 250 MHz utilisées dans le domaine de l'aéronautique, du spatial et de la défense ont une longueur d'onde de près d'un mètre, ce qui détermine la taille des antennes. Néanmoins, compte tenu des contraintes fortes d'encombrement à bord, une miniaturisation est grandement souhaitable, ce que permettent les antennes dites à plasma. En effet, pour ces mêmes ondes radio à 250 MHz, la taille des antennes à plasma est de 10 cm seulement, soit trois

fois plus petite que la plus petite des antennes de conception classique fonctionnant à cette fréquence.

Une antenne émet ou reçoit des ondes électromagnétiques ; si celles-ci sont très puissantes, elles peuvent détruire le circuit électronique connecté à l'antenne. Le CEA – DAM, qui étudie ces effets destructeurs et cherche à s'en protéger, a collaboré avec le laboratoire Laplace et l'ISAE-Supaéro à Toulouse pour développer et étudier une antenne à plasma (**figure 1**). Ce projet de recherche a été cofinancé par l'Agence de l'innovation de défense de la Direction générale de l'armement et par la Région Occitanie **2**.

Le fonctionnement de ces antennes n'est pas entièrement compris et la collaboration a élaboré un modèle physique visant à en donner une description. Dans une antenne métallique classique, l'émission ou la réception d'une onde tient aux oscillations des électrons de conduction du métal. Le plasma étant un milieu ionisé, il comporte des électrons libres qui se déplacent comme dans un métal. Dans une antenne à plasma, le milieu est peu ionisé, si bien qu'il a un comportement exotique et que ce type d'antenne a des performances prometteuses.

Dans l'antenne développée, le plasma est constitué d'une demi-boule de gaz ionisé dans lequel les électrons et les ions coexistent (**figure 1**). Les électrons, plus légers que les ions, peuvent être mis facilement en mouvement par le champ électrique d'une onde électromagnétique extérieure qui crée une force tendant à les écarter des ions. Néanmoins, comme les ions et les électrons s'attirent mutuellement, les électrons sont rappelés de manière naturelle vers les ions. Ces deux mécanismes opposés conduisent à ce qui est appelé un oscillateur, comme une masse accrochée à l'extrémité d'un ressort, et le nuage d'électrons

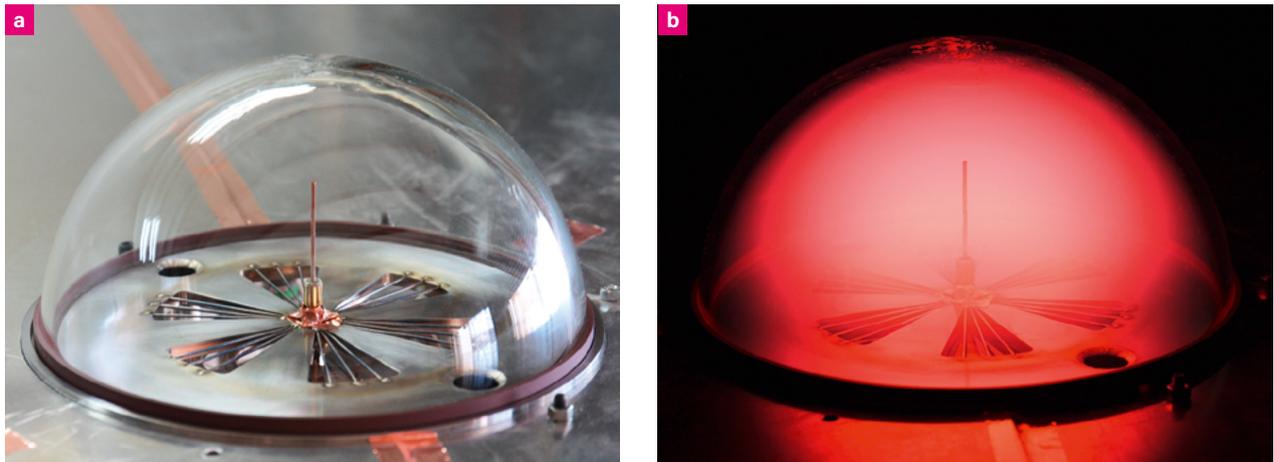


figure 1

Photographies de l'antenne à plasma. La cloche en verre contient **a** un gaz neutre qui devient **b** un plasma lorsqu'un courant radiofréquence circule dans la bobine adossée au plan métallique. La couleur rouge provient du rayonnement émis par le plasma.

fait des allers-retours autour du nuage d'ions qui reste quasiment immobile. Si le champ électrique du signal extérieur oscille à une fréquence particulière déterminée par la théorie des plasmas, l'oscillateur devient ce qui est appelé un résonateur et mène à une réponse maximale de l'antenne en collectant le courant électrique généré par le mouvement des électrons.

Décrivant ces comportements tout en restant simple et intuitif, le modèle

proposé dans **1** permet d'identifier les paramètres du plasma et de les piloter pour que sa résonance avec l'onde électromagnétique reçue se produise, comme cela a été confirmé avec les moyens expérimentaux du centre CEA – DAM de Gramat. Il constitue ainsi un outil décisif pour des capacités d'agilité en fréquence de l'antenne.

L'antenne transforme le champ électrique de l'onde électromagnétique reçue en une tension électrique s'appliquant

aux bornes d'un circuit électronique. Lorsque le champ augmente, la tension augmente et peut devenir élevée au point de détruire le circuit. La collaboration a montré dans **3** que la tension transmise au circuit par l'antenne à plasma atteint un plateau qui ne dépasse pas deux cents volts (**figure 2**), contrairement à une antenne classique. Ce résultat intéressant met en valeur un mécanisme qui pourrait être utilisé pour protéger les systèmes électroniques de réception de signaux électromagnétiques.

Même si le fonctionnement de l'antenne est maintenant mieux compris grâce au modèle développé, les travaux se poursuivent pour abaisser la tension plateau.

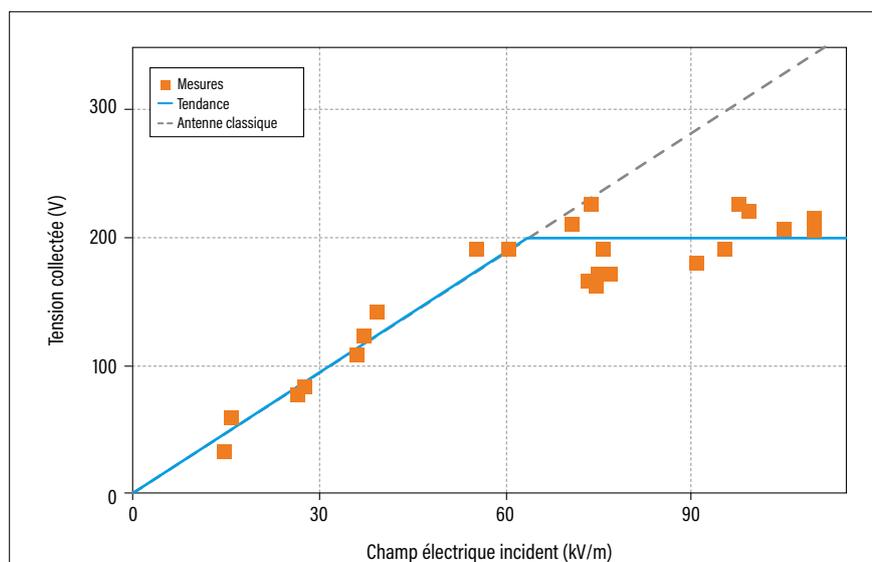


figure 2

Tension électrique transmise au circuit électronique par l'antenne en fonction du champ électrique de l'onde électromagnétique reçue, mesurée au centre CEA – DAM de Gramat. L'augmentation de la tension est limitée à une valeur plateau de 200 V alors qu'une antenne utilisant une technologie classique aurait transmis une surtension risquant de détruire les composants électroniques du système. Une antenne à plasma permet ainsi de protéger le circuit des agressions électromagnétiques.

RÉFÉRENCES

1 A. Laffont, R. Pascaud, T. Callegari, L. Liard, O. Pascal, J.-P. Adam, « A harmonic oscillator model to study the intensification of microwave radiation by a subwavelength uniform plasma discharge », *Phys. Plasmas*, **28**, 033503 (2021).

2 A. Laffont, Contribution à l'étude théorique, numérique et expérimentale d'une antenne VHF miniature exploitant une décharge plasma, thèse de doctorat soutenue le 2 février 2022 et délivrée par l'université Paul-Sabatier Toulouse III.

3 A. Laffont, J.-P. Adam, T. Callegari, L. Liard, O. Pascal, R. Pascaud, « Nonlinear effects of electromagnetic pulse on a plasma-based electrically small VHF antenna », *Proceedings of the 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2022)*, 27 mars au 1^{er} avril 2022, Madrid, Espagne, DOI 10.23919/EuCAP53622.2022.9769449.

Où est passé le sous-marin argentin disparu dans l'Atlantique Sud ?

Dans le cadre de ses missions, le CEA - DAM mesure à l'échelle mondiale les ondes acoustiques et sismiques qui se propagent dans l'atmosphère, dans les océans et à travers le globe terrestre. Un signal associé à la disparition du sous-marin argentin *San Juan* a été détecté le 15 novembre 2017 par deux stations hydroacoustiques du réseau de l'Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Otice) malgré leur éloignement de l'épave de plusieurs milliers de kilomètres. L'analyse minutieuse du signal réalisée par le CEA - DAM, grâce aux outils développés par ses équipes, a permis de caractériser l'accident de manière remarquable et avec une précision étonnante : la localisation obtenue se trouve à 3,5 km de l'épave et un scénario de double implosion a été élaboré puis validé [1](#).

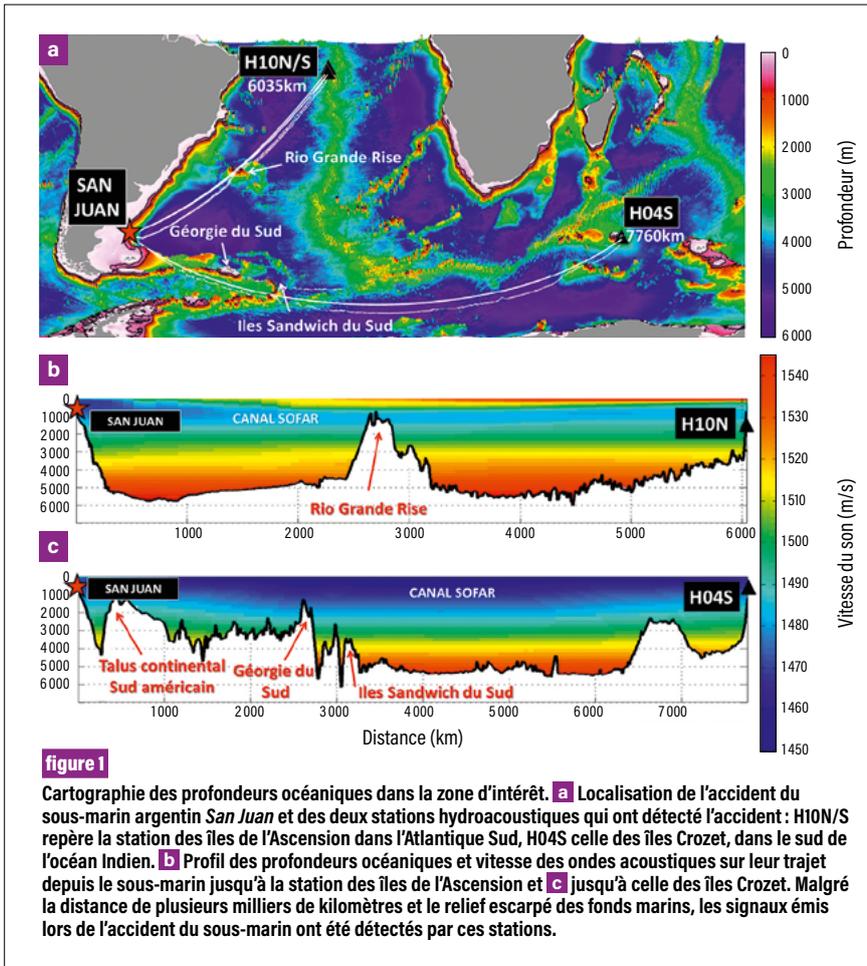
Le sous-marin argentin *San Juan* a signalé sa position pour la dernière fois le 15 novembre 2017 alors qu'il naviguait au large des côtes de l'Argentine. Un événement associé à sa disparition a été détecté quelques heures plus tard par deux stations hydroacoustiques du Système de surveillance international (SSI) de l'Otice ([figure 1](#)), l'une située aux îles de l'Ascension, dans l'Atlantique Sud, à environ 6 000 km de la dernière localisation, et l'autre aux îles Crozet, dans le sud de l'océan Indien, à environ 8 000 km. Chacune de ces stations comporte trois hydrophones maintenus à une profondeur variant de 600 à 1 200 m en étant suspendus à des flotteurs sous-marins et fixés à des ancres au fond de l'océan. Cette couche d'immersion de l'océan Atlantique, caractérisée par un minimum de température, constitue le canal Sofar (*SOund Fixing and Ranging*). Il joue un rôle de guide d'onde très efficace dans lequel les ondes hydroacoustiques peuvent se propager sur des milliers de kilomètres en étant très peu atténuées, rendant les réseaux d'hydrophones extrêmement performants.

Description du scénario à l'origine de l'accident

Pour faciliter l'interprétation des signaux supposés être consécutifs à la disparition du sous-marin, les détecteurs ont été étalonnés à partir de l'explosion d'une grenade réalisée par l'armée argentine deux semaines plus tard, le 1^{er} décembre 2017, à proximité de la dernière position connue du sous-marin. L'utilisation conjointe des signaux générés lors de ces deux événements a été déterminante dans cette étude [2](#). Les signatures communes - forme, durée et contenu spectral de l'onde hydroacoustique - ont tout d'abord permis de confirmer la nature brutale et rapide du naufrage du *San Juan*. Dans un second temps, grâce à une technique fine d'analyse du signal, la cause présumée du naufrage a pu être décomposée en deux implosions décalées de 332 millisecondes à 5 millisecondes près. Ces résultats, étayés par une modélisation de la trajectoire du sous-marin au moment de l'accident, ont conduit à déduire que l'implosion du compartiment avant du sous-marin s'est d'abord produite, puis a été suivie de celle du compartiment arrière. Ces implosions ont été confirmées par les images prises par la société américaine Ocean Infinity ayant retrouvé l'épave un an plus tard. À la suite d'une panne de propulsion, le *San Juan* s'est enfoncé sous son poids, puis ses compartiments ont implosé successivement après avoir atteint l'immersion de destruction, profondeur à laquelle la structure du sous-marin ne peut plus résister à la pression ambiante de l'eau (environ 500 m pour ce type de sous-marin).

Localisation précise de l'épave

La position précise du sous-marin au moment de l'accident a été calculée à l'aide des informations fournies par une méthode de traitement d'antennes développée au CEA - DAM [2](#). Cette méthode s'appuie sur la cohérence spatiale des ondes hydroacoustiques à l'échelle de la station composée de trois hydrophones distants d'environ deux kilomètres, et permet de déterminer les paramètres de propagation des ondes qui traversent la station, en particulier leur direction d'arrivée (azimut). Treize arrivées secondaires ont



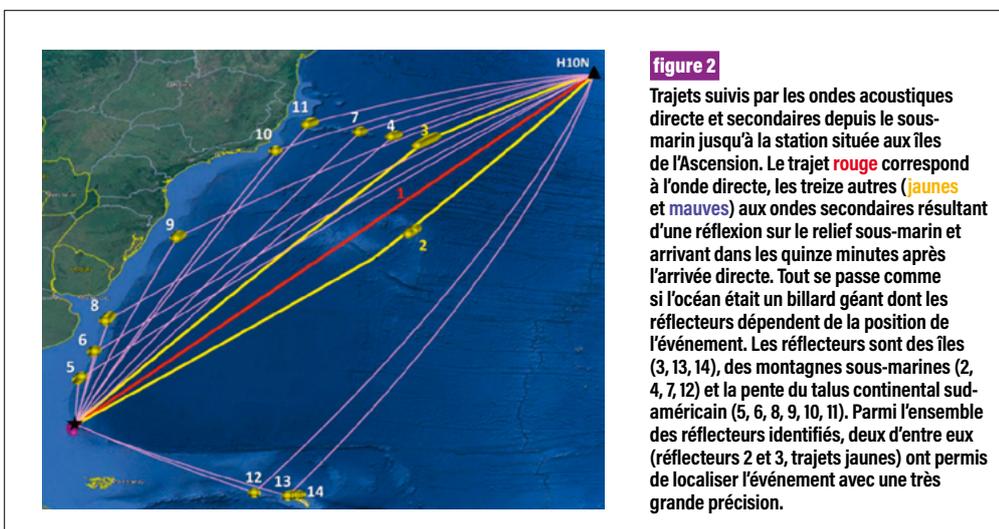
problème très sensible aux incertitudes liées aux modèles et à la mesure. Un travail d'expertise mené sur la localisation précise des treize réflecteurs a permis en revanche d'établir que deux d'entre eux contraignent la localisation. En exploitant les deux détecteurs avec une méthode originale dite d'inversion de paramètres, et connaissant la vitesse de propagation des ondes jusqu'aux deux stations et l'instant de déclenchement de la grenade d'étalonnage, le CEA – DAM a déduit que l'accident s'est produit aux coordonnées 45,97° S 59,81° O à 29 km près dans la direction ONO-ESE et 15 km près dans la direction SSO-NNE, et à 13 heures 51 minutes et 5 secondes, à 5 secondes près, le 17 novembre 2017. Obtenue avec seulement des données hydroacoustiques enregistrées par deux stations très éloignées, cette localisation se situe à 3,5 km de l'épave, un résultat tout à fait remarquable.

Même si le nombre de stations hydroacoustiques du Système de surveillance internationale de l'Otice est limité (six au total), l'étude de la disparition du sous-marin *San Juan* a permis de démontrer les formidables capacités de détection et d'analyse qu'offrent ces instruments de mesure pour des sources localisées dans les océans ou à proximité directe.

ainsi été identifiées à la station des îles de l'Ascension dans les quinze minutes qui ont suivi l'arrivée directe (figure 2). Ces arrivées, caractérisées par des temps et des azimuts différents de ceux de l'onde directe, correspondent à des réflexions sur des îles, des montagnes sous-marines ou le talus continental sud-américain. Les bassins océaniques

sont comme des billards géants pour les ondes hydroacoustiques, dont les réflecteurs mis en jeu sont à identifier pour chaque événement.

L'exploitation classique des arrivées directes n'a pas permis de calculer une localisation précise du sous-marin : le peu de mesures et les très grandes distances de propagation rendent le



RÉFÉRENCES

1 J. Vergoz, Y. Cansi, Y. Cano, P. Gaillard, « Analysis of hydroacoustic signals associated to the loss of the Argentinian ARA *San Juan* submarine », *Pure and Applied Geophysics*, <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02625-7> (2021).
2 P. Gaillard, J. Vergoz, A. Trilla, « Techniques de détection et traitement massif de données » dans *Détection des essais nucléaires - À l'écoute du globe*, revue *chocs*, **50**, p. 49-57 (2020).

A. Vallage, L. Bollinger, J. Champenois, C. Duverger, A. Guilhem Trilla, B. Hernandez, A. Le Pichon, C. Listowski, G. Mazet-Roux, M. Ménager, B. Pinel-Puysségur, J. Vergoz
[CEA - DAM, centre DAM Île-de-France]

Portrait-robot d'un séisme français

Dans le cadre de sa mission de surveillance des explosions et essais nucléaires, le CEA - DAM développe différentes technologies de détection. Ces technologies servent également à la surveillance de la sismicité métropolitaine en lien avec la mission d'alerte aux autorités de sécurité civile en cas de forte secousse : leur synergie sert surtout à la caractérisation des séismes, primordiale pour la mission d'expertise du pôle de compétence Aléa sismique, qui intervient après l'alerte des premières minutes. Bien que la France métropolitaine soit située à l'intérieur d'une plaque tectonique, où les forts séismes sont très rares, le séisme du Teil rappelle que le risque est bien présent. À cette occasion et pour la première fois, le CEA - DAM a mis en évidence le bénéfice qu'apporte la synergie de ses moyens de détection [12](#), mise en œuvre ici pour un séisme survenu en métropole.

Le séisme du Teil, le plus fort enregistré en France depuis seize ans [1](#), s'est produit le 11 novembre 2019 à 5 km à l'ouest de la ville de Montélimar et a provoqué de nombreux dégâts sur la commune du Teil (900 bâtiments endommagés). Le CEA - DAM a émis une alerte sismique à destination des autorités, puis a analysé en détail cet événement à l'aide de technologies sismique, acoustique et satellitaire. La synergie entre ces trois technologies a mis en évidence une rupture de la surface terrestre effectivement mesurée sur le terrain.

Données sismologiques

Plusieurs centaines de stations sismologiques issues du réseau de surveillance national du CEA - DAM et des réseaux sismologique et géodésique français ont été utilisées afin de localiser cet événement situé sur le réseau de failles des Cévennes ([figure 1](#)). Cette analyse a permis d'estimer la profondeur de la rupture, particulièrement faible, entre un et deux kilomètres, l'énergie dégagée, correspondant à une magnitude locale de 5,4, soit de l'ordre de

10^{12} joules ou l'équivalent de quelques centaines de tonnes d'explosif, ainsi que le type de mouvement (compressif) qui s'est produit sur la faille responsable du séisme. Dans un second temps, ce travail sismologique permet de comparer les enregistrements réels sur tout le territoire métropolitain avec des lois empiriques de prédiction du mouvement du sol couramment utilisées pour l'évaluation de l'aléa sismique (probabilité d'occurrence d'un séisme dans une région donnée).

Données radar satellitaires

L'interférométrie radar satellitaire (InSAR) consiste à analyser les différences entre une image radar acquise avant et une autre acquise après un séisme. Avec cette technique, il est possible de mesurer avec précision le déplacement du sol dans la zone observée par le satellite entre deux passages. Son application à la mesure des séismes, et plus particulièrement à celui du Teil de 2019, permet d'imager l'étendue spatiale des mouvements mesurables en surface et d'identifier précisément la faille responsable de ce séisme ainsi que sa rupture en surface ([figure 2a](#)). De plus, cette technologie rend possible la modélisation du glissement qui s'est produit sur la faille afin de reproduire le plus fidèlement possible les observations de surface. Cette rupture correspond à un déplacement de l'ordre de 10 cm en surface et 30 cm en profondeur le long d'une faille de 5 km de long ([figure 2b](#)). Ces propriétés sont ensuite utilisées pour des simulations numériques dans le cadre de l'évaluation de l'aléa sismique.

Données infrasonores

Les données dites infrasonores proviennent de la vibration du sol générée par le séisme qui donne naissance à une onde acoustique, ou infrason, se propageant dans l'air. À partir d'enregistrements sur des capteurs spécifiques et de la connaissance des conditions météorologiques du jour, il est possible de remonter à la zone du sol ayant tremblé et d'estimer le pic de pression de surface à l'origine des ondes. Cette information, au plus proche de la source, aide à contraindre davantage les lois de prédiction du mouvement du sol.



figure 1

Réseaux de mesures utilisés afin de caractériser le séisme du Teil (localisé par l'étoile rouge). Outre les stations du CEA - DAM (croix noires) et du réseau sismologique français Resif regroupant stations vélocimétriques (triangles bleus) et accélérométriques (carrés orange) qui ont permis de localiser l'événement, une station infrasonore (étoile violette) près de Manosque et les stations SNCF (points jaunes, participant à l'alerte pour la ligne à grande vitesse sud-est) ont été utilisées afin de suivre la propagation des ondes dans la croûte terrestre. Les stations entourées d'un losange ont plus particulièrement participé à mesurer la profondeur et la magnitude du séisme.

Synergie multi-technologies

L'analyse proposée dans 1 a montré la très forte cohérence et la grande complémentarité des résultats obtenus indépendamment par chacune des technologies employées. La faille identifiée comme la source de ce séisme s'appelle la faille de la Rouvière (pointillée sur la figure 2a), aussi observée et mesurée sur le terrain 3, fait remarquable en France

métropolitaine. Cette ancienne faille a été réactivée afin d'accommoder un mouvement compressif entre un bloc sud-est et un bloc nord-ouest, mesurable en surface et depuis l'espace. La compréhension affinée de ce séisme permet de l'inclure dans les données régionales 4 pour les futures études d'aléa sismique (localisation, magnitude et type de mouvement), base de travail du génie parasismique.

RÉFÉRENCES

- 1 A. Vallage, L. Bollinger, J. Champenois, C. Duverger, A. Guilhem Trilla, B. Hernandez, A. Le Pichon, C. Listowski, G. Mazet-Roux, M. Ménager, B. Pinel-Puysegur, J. Vergoz, « Multitechnology characterization of an unusual surface rupturing intraplate earthquake: The ML 5.4 2019 Le Teil event in France », *Geophysical Journal International*, **226**, p. 803-813 (2021).
- 2 Collectif du CEA - DAM, *Détection des essais nucléaires - À l'écoute du globe*, revue *chocs*, **50**, 112 p. (2020).
- 3 J.-F. Ritz, S. Baize, M. Ferry, C. Larroque, L. Audin, B. Delouis, E. Mathot, « Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France », *Nature communications Earth & Environment*, **1**, 10 (2020).
- 4 L. Bollinger, K. Le Dortz, C. Duverger, A. Vallage, S. Marin, Y. M. Leroy, « Seismic swarms in Tricastin, lower Rhône Valley (France): Review of historical and instrumental seismicity and models », *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Géoscience - Sciences de la planète*, **353**, p. 585-606, <https://doi.org/10.5802/crgeos.93> (2021).

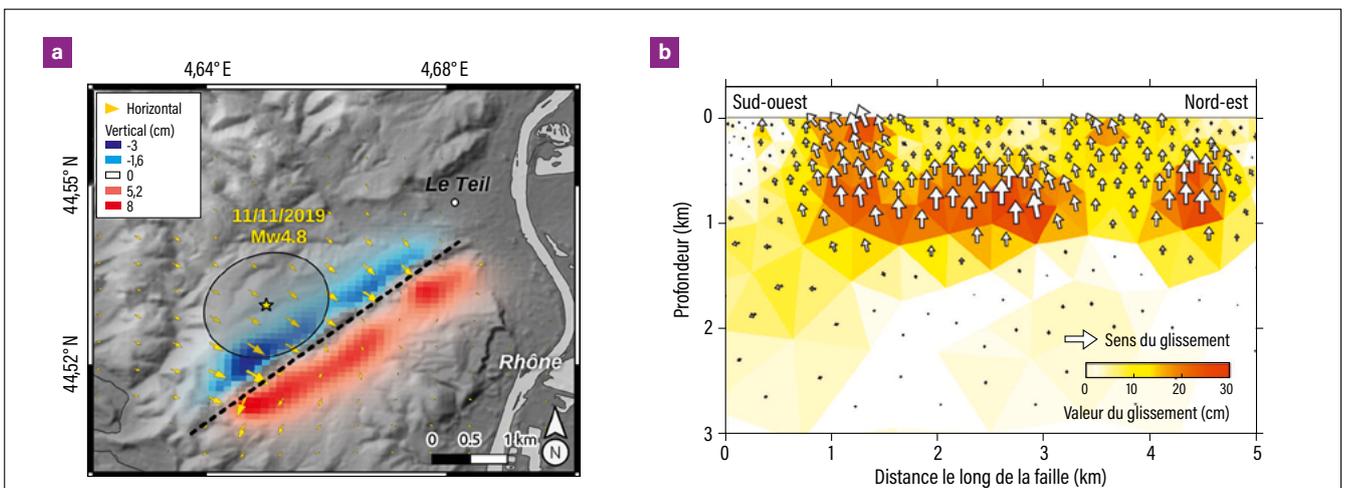


figure 2

Caractéristiques du séisme en surface ; l'étoile indique l'épicentre du séisme. a Déplacements de surface observés par satellite. La couleur bleue indique un affaissement du sol tandis que la couleur rouge indique un soulèvement. Les flèches jaunes montrent les déplacements horizontaux. b Glissements verticaux modélisés sur la faille en profondeur permettant de restituer les déplacements mesurés en surface par satellite. Le séisme s'est produit entre un et deux kilomètres de profondeur, les flèches indiquent le sens du glissement vertical, correspondant au soulèvement en rouge sur la figure 2a.

Quand le chant des vagues évoque l'atmosphère

Les infrasons générés par l'interaction des vagues à la surface des océans se propagent dans l'atmosphère jusqu'à 100 km d'altitude environ. Leur propagation est influencée par la dynamique de l'atmosphère et, de ce fait, leur détection à l'échelle du globe terrestre fournit une information détaillée de cette influence. Les récents développements théoriques du CEA – DAM et de l'Ifremer permettent de modéliser plus finement l'origine de ces infrasons qui constituent un bruit permanent dans les signaux d'intérêt pour le CEA – DAM **1**. Ces développements ouvrent des perspectives pour améliorer les modèles numériques de prévisions météorologiques, également utilisés dans ses analyses de signaux.

Dans le cadre de ses missions d'expertise pour le contrôle du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires, le CEA – DAM exploite en routine les données du Système de surveillance internationale (SSI) associé au Traité. Ce système s'appuie notamment sur la mesure d'infrasons. La détection des explosions nucléaires – et des infrasons qu'elles génèrent – consiste à traiter le flux continu des enregistrements jusqu'à obtenir un diagnostic suffisamment précis pour caractériser la source des signaux détectés.

Des infrasons sont aussi générés par des événements d'origine naturelle (séisme, éruption volcanique, orage, etc.) ou anthropique (explosion accidentelle). Dans la bande de fréquence d'intérêt pour la surveillance d'explosions nucléaires (0,02 à 4 Hz), la houle océanique (autour de 0,2 Hz) est une source dominante et permanente de bruit, car les infrasons qu'elle émet se propagent sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres. Ces infrasons sont générés lorsque des vagues de même fréquence se propagent dans des directions opposées se superposent. Les perturbations de pression résultantes se propagent, d'une part, sous forme d'ondes sismiques par un couplage avec la croûte terrestre après avoir traversé l'océan et, d'autre part, dans l'atmosphère

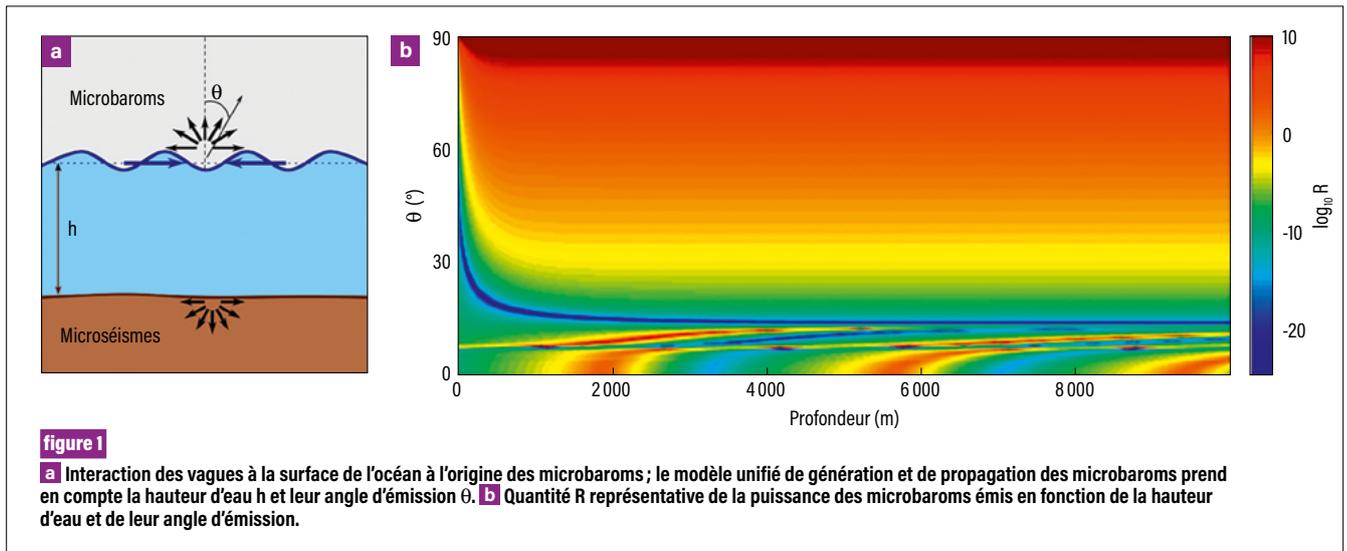
sous forme d'infrasons nommés microbaroms (**figure 1a**). Une meilleure compréhension des microbaroms est à ce jour nécessaire pour améliorer les capacités de détection des infrasons générés par une explosion nucléaire.

Un modèle unifié de source de bruit océanique

Une collaboration entre le Laboratoire d'océanographie physique et spatiale de l'Ifremer et une équipe du centre CEA – DAM Île-de-France a construit un nouveau modèle intégrant le modèle de vagues développé par l'Ifremer et le modèle de source des microbaroms du CEA – DAM Île-de-France **2**. Ce modèle unifié prend en compte la profondeur de l'océan ainsi que la direction préférentielle d'émission des microbaroms. Pour une profondeur de 2 000 m, les microbaroms les plus intenses (zones en rouge sur la **figure 1b**) sont émis dans une direction entre 0 et 15° par rapport à la verticale d'une part, entre 60 et 90° d'autre part.

Ce modèle a été implémenté sur le calculateur Datarmor de l'Ifremer à Brest qui hébergeait déjà son modèle de vagues. Malgré la masse considérable de données, les simulations numériques ont permis de calculer les caractéristiques des microbaroms à l'échelle du globe terrestre en temps quasi réel, en particulier leur intensité et leur direction d'arrivée sur les stations de mesure du SSI **1**.

Ces résultats numériques ont été comparés à ceux provenant d'une base de données constituée de signaux mesurés par quarante-cinq stations infrasonores du SSI pendant sept années. Un exemple est donné sur la **figure 2**, qui illustre l'excellent accord de cette comparaison. Plus généralement, le nouveau modèle offre une plus grande capacité prédictive que les précédents dans des domaines comme la circulation océanique ou la modélisation de l'interface océan-atmosphère.



À l'écoute de la dynamique atmosphérique

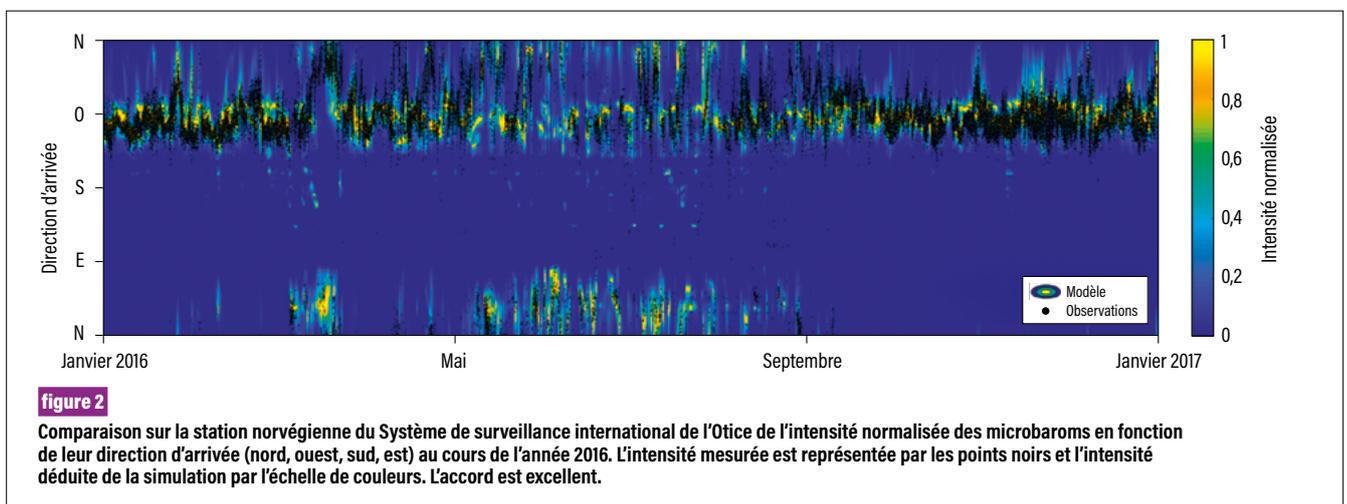
Le modèle implémenté sur le calculateur de l'Ifremer est un produit opérationnel. Il est utilisé en routine par le CEA – DAM pour l'analyse de signaux d'intérêt. Son exploitation contribue aussi à améliorer la connaissance de la moyenne atmosphère jusqu'à 100 km d'altitude environ et de ses incertitudes. En effet, l'état de l'atmosphère est estimé par les centres de prévision météorologique à des résolutions spatiale et temporelle qui ne cessent de croître. Cependant, la comparaison entre les prévisions et la météorologie réelle met en évidence un défaut systématique de variabilité à petite échelle et des biais persistants communs à l'ensemble des modèles qui complexifient

le travail de l'analyste **3**. Les microbaroms dépendant fortement des conditions de propagation, leur détection à l'échelle globale par les stations du Système de surveillance international fournit depuis plus de vingt ans une image détaillée et unique de la dynamique atmosphérique. La mise au point de nouvelles méthodes d'assimilation ouvre des perspectives pour exploiter les microbaroms et mieux contraindre les conditions initiales des modèles météorologiques.

En conclusion, ce développement contribue à mieux contraindre les modèles météorologiques et permet de caractériser au mieux les microbaroms pour limiter le nombre de fausses alarmes dans l'analyse des signaux réalisée au CEA – DAM.

RÉFÉRENCES

- 1** M. De Carlo, P. Hupe, A. Le Pichon, L. Ceranna, F. Ardhuin, « Global microbarom patterns: a first confirmation of the theory for source and propagation », *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL090163 <https://doi.org/10.1029/2020GL090163> (2021).
- 2** M. De Carlo, F. Ardhuin, A. Le Pichon, « Atmospheric infrasound generation by ocean waves in finite depth: unified theory and application to radiation patterns », *Geophysical Journal International*, **221**, p. 569-585 <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa015> (2020).
- 3** A. Le Pichon, É. Blanc, A. Hauchecorne, *Infrasound monitoring for atmospheric studies: Challenges in middle atmosphere dynamics and societal benefits*, Springer Nature, ISBN 978-3-319-75140-5, 1167 pages (2019).



J. Amestoy, P. Richon, A. Delpuech, P. Chotard [CEA – DAM, centre DAM Île-de-France]
P.-Y. Meslin, H. Raynal [Institut de recherche en astrophysique et planétologie (IRAP), Toulouse]
S. Derrien, É. Pique [Laboratoire d'aérodynamique (Laero), Toulouse]
D. Baratoux [Laboratoire géosciences environnement Toulouse (GET), Toulouse]

Une cartographie hélico presto pour mesurer la radioactivité

Les sites industriels ayant une activité nucléaire ou radiologique, civile ou militaire, font l'objet d'une surveillance étroite vis-à-vis de leurs éventuels rejets de radioactivité. Pour cela, la radioactivité naturelle de chaque site doit être connue. Le CEA – DAM dispose d'un spectromètre héliporté qui permet d'établir un diagnostic radiologique en quelques heures. Des paramètres environnementaux (humidité du sol, radon atmosphérique, etc.) causent d'importantes variations au fil du temps dans la mesure de la radioactivité naturelle et le CEA – DAM a collaboré avec l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie de Toulouse dans le but de s'en affranchir. Une campagne a ainsi permis de suivre pendant quatorze mois l'évolution couplée de ces paramètres et de la radioactivité naturelle, et a abouti à un protocole de correction qui conduit à une grande finesse des mesures **12**.

Depuis que la Terre s'est formée il y a quelques milliards d'années, la radioactivité est présente dans tous les milieux, terre, eau, air ; le corps humain aussi est radioactif. Il s'agit de la radioactivité dite naturelle avec laquelle l'homme vit depuis la nuit des temps. Sur un site industriel ou de recherche ayant une activité nucléaire ou radiologique, civile ou militaire, une radioactivité dite artificielle peut s'ajouter à la radioactivité naturelle à la suite d'un rejet lié à l'activité du site. Les rejets autorisés sont strictement encadrés par la loi et ces sites font l'objet d'une surveillance radiologique étroite. Pour qu'une radioactivité artificielle puisse être détectée, elle doit pouvoir se distinguer de la radioactivité naturelle. Il est donc indispensable de connaître la radioactivité naturelle du site.

Le CEA – DAM dispose d'un système de cartographie radiologique héliporté, appelé Hélinuc™ (figure 1), qui permet d'établir en quelques heures un

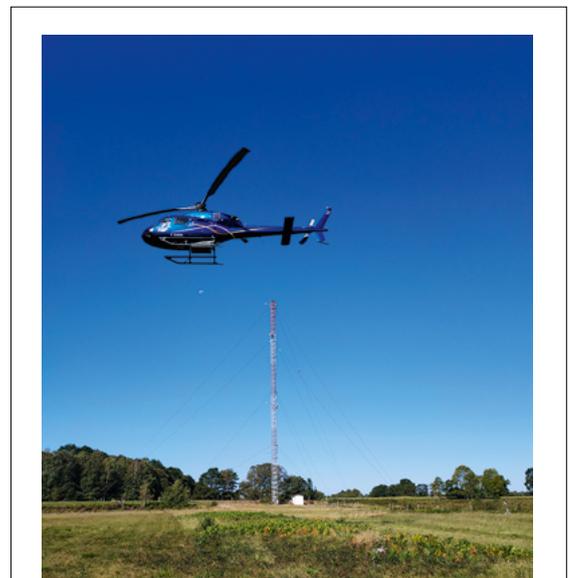


figure 1

Photographie montrant le système de cartographie radiologique héliporté, appelé Hélinuc™, installé sous l'hélicoptère, et le mât météorologique du centre de recherches atmosphériques de Lannemezan. Lors de la cartographie d'un site, le système embarqué Hélinuc™ enregistre les signaux gamma à une altitude de 50 m. La campagne de mesure réalisée récemment à Lannemezan a consisté à suivre l'évolution couplée de paramètres environnementaux (humidité du sol, taux de radon atmosphérique, etc.) et de la radioactivité naturelle détectée sur le mât, à 50 m de hauteur.

diagnostic radiologique dans une zone de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres carrés. Tous les sites d'intérêt sont cartographiés pour que la radioactivité naturelle de chacun soit connue. L'hélicoptère vole à 70 km/h à une altitude de 50 m et suit un parcours prédéfini. Le système de détection embarqué, appelé spectromètre gamma, mesure

chaque seconde le rayonnement gamma qui l'atteint, prenant en quelque sorte une photographie de la radioactivité en tous points prédéfinis du site.

Les contributeurs naturels au rayonnement gamma sont le sol, par l'intermédiaire des émetteurs que sont le potassium, l'uranium, le thorium et leurs descendants, et l'air par l'intermédiaire du gaz radon. Chaque élément radioactif est reconnaissable par ses raies d'émission gamma qui se distinguent par leur intensité et leur énergie d'émission. Le système embarqué mesure un signal qui se traduit par un spectre donnant l'intensité en fonction de l'énergie. Un troisième contributeur ajoute une composante continue au spectre mesuré : il s'agit du rayonnement dit cosmique, car résultant de l'interaction de particules chargées avec l'atmosphère terrestre.

Pour un site donné, il est essentiel que la cartographie radiologique, c'est-à-dire l'ensemble des spectres mesurés en tous points du site, soit reproductible dans le temps. Or, des variations temporelles non liées à une radioactivité artificielle ont été observées et des paramètres ont été identifiés comme étant à l'origine de certaines variations, notamment le taux d'humidité du sol et la concentration volumique du radon atmosphérique. Pour étudier l'influence de ces paramètres, le CEA – DAM a collaboré avec l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie de Toulouse afin de suivre sur quatorze mois consécutifs l'évolution couplée de la radioactivité naturelle et de ces paramètres. Les mesures ont été réalisées au centre de recherches atmosphériques de Lannemezan, rattaché au Laboratoire d'aérodynamique de Toulouse,

avec un spectromètre gamma installé sur un mât météorologique à 50 m du sol, comme le spectromètre hélicopté.

La collaboration a montré qu'une variation d'humidité du sol de 25 % entre l'été et l'hiver conduit à une variation du même ordre de grandeur de l'amplitude du signal gamma issu de la radioactivité contenue dans le sol, la présence d'humidité conduisant à une atténuation du signal gamma. Cette étude a aussi mis en évidence une variation de près de 4 % de l'amplitude du signal gamma de l'uranium contenu dans le sol liée à une variation de concentration du radon atmosphérique qui varie entre l'été et l'hiver. Entre ces deux saisons, l'amplitude du signal gamma varie ainsi de près de 30 % !

Ces variations étant établies, il est désormais possible de corriger une mesure gamma pour que le résultat ne dépende plus du moment auquel elle a été faite dans l'année (figure 2). Ce protocole de correction, développé et validé sur un site naturel, sera appliqué à l'ensemble des cartographies réalisées sur les sites d'intérêt, rendant ainsi possible la surveillance radiologique fine à long terme.

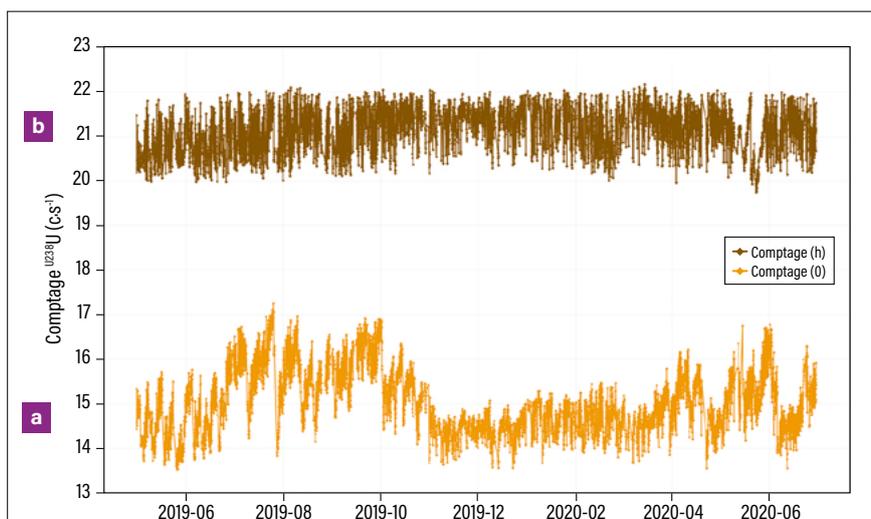


figure 2

Évolution du signal gamma de l'uranium mesuré au centre de recherches atmosphériques de Lannemezan entre avril 2019 et juillet 2020 **a** avant et **b** après application du protocole de correction des variations d'humidité du sol et du radon atmosphérique. Après correction, le signal gamma est constant au fil du temps et représentatif de l'environnement radiologique naturel du site. Le protocole rend ainsi possible la surveillance radiologique fine à long terme.

RÉFÉRENCES

- 1** J. Amestoy, P.-Y. Meslin, P. Richon, A. Delpuech, S. Derrien, H. Raynal, É. Pique, D. Baratoux, P. Chotard, P. Van Beek, M. Souhaut, T. Zambardi, « Effects of environmental factors on the monitoring of environmental radioactivity by airborne gamma-ray spectrometry », *Journal of Environmental Radioactivity*, **237**, 106695 (2021).
- 2** J. Amestoy, *Étude de l'influence des facteurs environnementaux sur la spectrométrie gamma aéroportée et application à la surveillance environnementale de sites*, thèse de doctorat soutenue le 19 mars 2021 et délivrée par l'université Paul-Sabatier Toulouse III.

Une couche carbonée pour ralentir l'oxydation du plutonium

En France, le coût de la corrosion est estimé à vingt-cinq milliards d'euros par an. La question est d'autant plus stratégique quand elle touche un métal, le plutonium, qui est utilisé dans les armes de la dissuasion nucléaire française. Depuis des décennies, les chercheurs tentent de percer le mystère des mécanismes d'oxydation de ce métal aux propriétés peu ordinaires. Une équipe du CEA – DAM et du laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne a montré récemment qu'un traitement thermique particulier du plutonium conduit à la formation en surface d'une couche d'oxycarbure de plutonium de type PuCO qui protège le métal de l'oxydation ¹.



Le plutonium est un rêve pour les scientifiques mais un cauchemar pour les ingénieurs», écrit S. Hecker, directeur du Los Alamos National Laboratory de 1986 à 1997 ². En effet, cet élément

reste un des plus mystérieux parmi les éléments de la classification périodique manipulés par l'homme.

Le plutonium possède des propriétés surprenantes avec six états cristallographiques différents, appelés phases, sur une plage de température peu étendue, de la température ambiante à celle de la fusion à 640 °C. Sa densité varie de plus de 20 %, ses propriétés magnétiques sont encore controversées, etc. C'est un élément radioactif qui doit être confiné en boîte à gants pour être manipulé. Il est aussi hautement réactif à l'air : brillant quand il vient d'être usiné, il se ternit en quelques minutes par oxydation (figure 1).

La France ayant décidé en 1998 d'arrêter définitivement la production de matières fissiles destinées aux armes nucléaires, elle ne produit plus de plutonium de qualité militaire. La matière nécessaire à la dissuasion est exclusivement recyclée. L'oxydation de cette matière stratégique doit donc être contenue

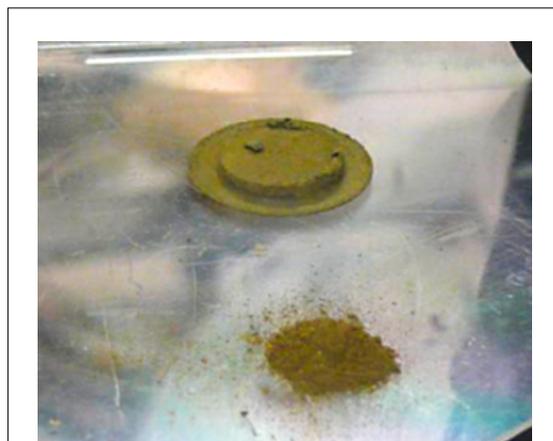


figure 1

Photographie d'un échantillon de plutonium métallique dans un état d'oxydation avancé, à côté d'une poudre d'oxyde de plutonium qui s'est détachée de l'échantillon.

d'une part pour que son intégrité soit garantie, notamment pendant les phases d'entreposage, d'autre part pour que les coûts de retraitement des oxydes produits par la corrosion soient maîtrisés.

Au contact d'oxygène, deux couches d'oxydes de plutonium différents se forment sur le métal : le sesquioxyde, de formule Pu_2O_3 , en contact direct avec le métal et le dioxyde, de formule PuO_2 , en surface. Lorsque le métal contient une quantité non négligeable d'atomes de carbone et qu'il est porté à 350 °C sous vide, il peut aussi se former une couche d'oxycarbure de plutonium de type PuC_xO_y . Cette couche s'avère protectrice face à l'oxydation. Une

technique spectroscopique a permis de la localiser entre le métal et la couche de Pu_2O_3 . Des calculs de modélisation thermodynamique ont montré que la formule de l'oxycarbure serait proche de $\text{PuC}_{0,2}\text{O}_{0,8}$.

Influence de la couche d'oxycarbure sur la vitesse d'oxydation

Afin de caractériser l'influence de la couche d'oxycarbure sur l'oxydation du métal, la vitesse d'oxydation a été

mesurée lors d'une exposition à de l'oxygène O_2 à 150°C de deux échantillons, l'un sans couche d'oxycarbure et le second avec une couche de quelques dizaines de couches atomiques, soit 50 nanomètres (nm) ou milliardièmes de mètre (figure 2).

L'échantillon sans couche d'oxycarbure s'oxyde rapidement. À partir de 30 h d'exposition, la couche d'oxyde PuO_2 en surface devient poreuse, friable, et les molécules d'oxygène O_2 ont accès directement à la couche de

Pu_2O_3 qui s'oxyde alors rapidement pour se transformer en PuO_2 (figure 2a). La vitesse d'oxydation croît, l'épaisseur d'oxyde augmente considérablement, en particulier celle du PuO_2 . C'est ce qui est appelé l'oxydation catastrophique. L'échantillon se détériore ensuite en quelques centaines d'heures, de manière semblable à l'échantillon de la figure 1.

Dans les mêmes conditions d'exposition aux molécules O_2 , l'échantillon qui possède une couche de 50 nm d'oxycarbure voit ses couches d'oxyde croître plus lentement, c'est le cas en particulier de la couche de PuO_2 . Celle-ci ne se fragilise pas et la surface de l'échantillon ne présente aucune trace de détérioration au bout de 200 h (figure 2b). Une expérience complémentaire a montré qu'un échantillon disposant d'une couche de 250 nm ne présente aucune croissance des oxydes après cinq jours d'exposition à l'oxygène à un dixième de la pression atmosphérique et à 150°C . Ces résultats montrent qu'il est possible de former une couche d'oxycarbure par un traitement thermique adapté. Cette couche protège le plutonium métallique de l'oxydation et ralentit considérablement sa détérioration.

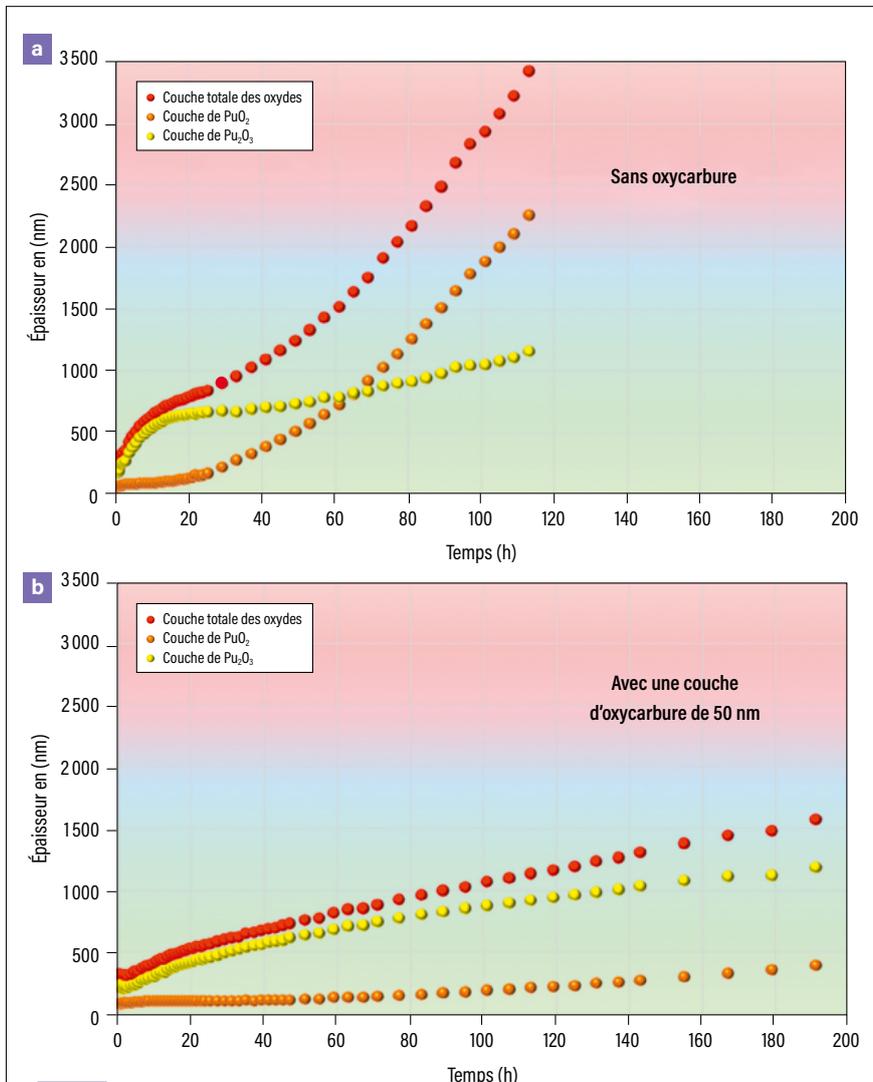


figure 2

Vitesse d'oxydation du plutonium métallique mesurée dans le centre CEA-DAM de Valduc : augmentation de l'épaisseur de la couche externe d'oxyde PuO_2 (en orange), de la couche interne d'oxyde Pu_2O_3 (en jaune) et de la couche totale (en rouge) en fonction du temps d'exposition à l'oxygène à un dixième de la pression atmosphérique et à 150°C pour a) un échantillon de plutonium sans oxycarbure et pour b) un échantillon avec oxycarbure (couche de 50 nm). Ces résultats montrent clairement que la couche d'oxycarbure diminue drastiquement l'oxydation du métal et contribue ainsi à le protéger.

RÉFÉRENCES

- 1 N. Favart, B. Ravat, L. Jolly, B. Oudot, L. Berlu, F. Delaunay, I. Popa, S. Chevalier, « Characterization of PuO/PuCO -type phase and its influence on the oxidation kinetics of δ -plutonium », *Oxidation of Metals*, **96**, p. 271-281 (2021).
- 2 S. Hecker, « Plutonium – An element at odds with itself », *Los Alamos Science*, **26**, p. 16-23 (2000).

La pression pour améliorer le stockage d'hydrogène ?

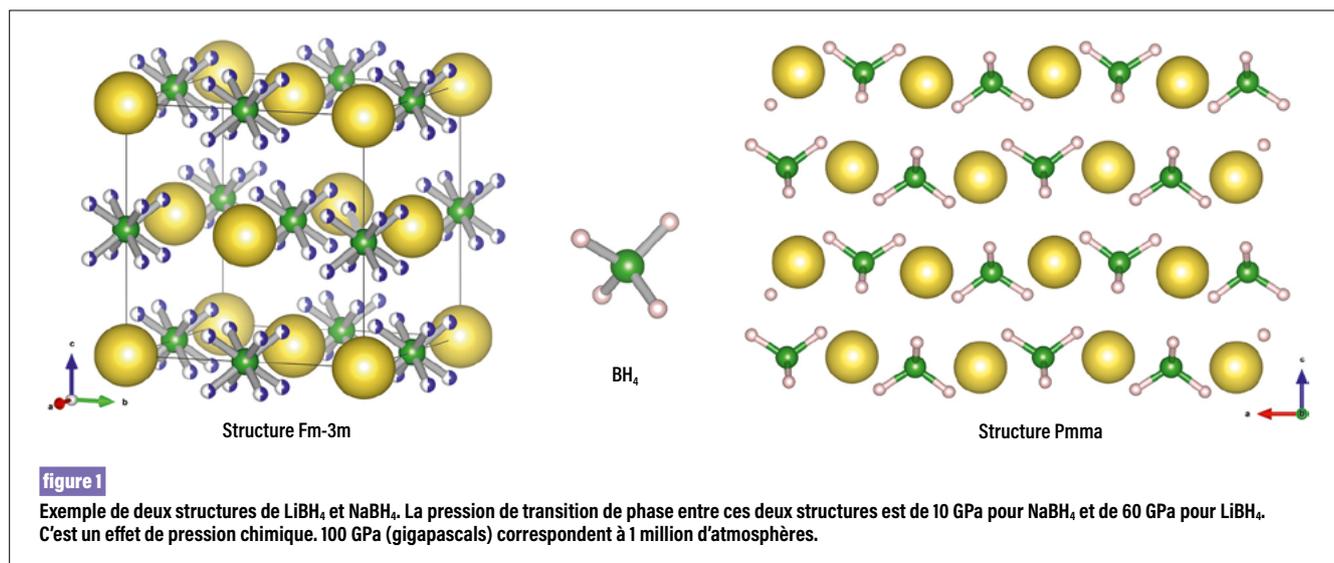
Depuis la découverte des superhydrures il y a presque dix ans, il est maintenant admis que l'effet de la pression sur les hydrures peut être spectaculaire. Une équipe du centre CEA – DAM Île-de-France a étudié l'effet de la pression sur les borohydrures de lithium et de sodium, deux matériaux déjà très étudiés pour le stockage d'hydrogène à pression ambiante. De manière inattendue, elle a constaté que dans ces deux composés la pression a un effet inverse de celui attendu : la liaison chimique de l'hydrogène avec le bore est renforcée par la pression et aucun enrichissement du stockage d'hydrogène n'a été observé, même sous des pressions d'hydrogène de l'ordre du million d'atmosphères **1**. Une très grande variété de structures a en revanche pu être révélée grâce à la mise en place d'un arsenal méthodologique, illustrant parfaitement le concept de pression chimique, ce qui va maintenant être déployé pour rechercher de nouveaux hydrures par pression.

Les hydrures sont des matériaux solides dans lesquels l'atome d'hydrogène est combiné avec un ou plusieurs éléments. Leurs liaisons peuvent être métalliques, covalentes ou ioniques. Ils font depuis plusieurs décennies l'objet d'intenses recherches, car ils pourraient servir de moyen de stockage de l'hydrogène. Dans de tels composés, en effet, il est possible de stocker une très grande densité d'hydrogène – proche de celle de l'hydrogène liquide – tout en restant à l'état solide et à température ambiante, ce qui représente un avantage considérable. C'est le cas des borohydrures de lithium (LiBH_4) et de sodium (NaBH_4) qui présentent l'avantage supplémentaire d'être constitués d'éléments métalliques légers (bore, lithium, sodium),

une condition nécessaire pour que le système de stockage d'hydrogène demeure suffisamment léger pour pouvoir être utilisé dans le domaine des transports. Leur température de désorption d'hydrogène, proche de 380°C , est toutefois trop élevée pour une utilisation sociétale.

L'utilisation du paramètre pression pourrait permettre de rendre ces matériaux plus attractifs. En effet, la chimie des hydrures a récemment connu une révolution dans le contexte des hautes pressions : l'application de quelques centaines de milliers ou millions d'atmosphères sur des métaux ou hydrures, en présence d'hydrogène en excès, accroît la solubilité de l'hydrogène et conduit à la formation de composés extrêmement riches en hydrogène appelés superhydrures. Outre les potentialités évidentes que de tels systèmes présenteraient pour le stockage de l'hydrogène s'ils pouvaient être ramenés à pression ambiante, d'autres propriétés spectaculaires ont été observées dans les phases métalliques de ces superhydrures. Ainsi, le décahydrure de lanthane LaH_{10} **2,3** est un supraconducteur (système pouvant conduire le courant électrique sans pertes) à une température proche de la température ambiante.

Le but de cette étude était donc de partir de deux hydrures ternaires déjà très connus pour le stockage d'hydrogène et de voir si leur compression sous une très haute pression d'hydrogène permettait de les enrichir en hydrogène. Un autre effet recherché était d'utiliser l'effet d'affaiblissement des liaisons chimiques sous pression pour trouver une structure dans laquelle la désorption en température serait facilitée. LiBH_4 et NaBH_4 sont des hydrures particuliers, avec une structure atomique formée d'un empilement de tétraèdres $[\text{BH}_4]^-$ et d'ions alcalins Li^+ ou Na^+ (figure 1). Sous pression, l'entité $[\text{BH}_4]^-$ devrait être déstabilisée, permettant alors une désorption plus facile des hydrogènes.



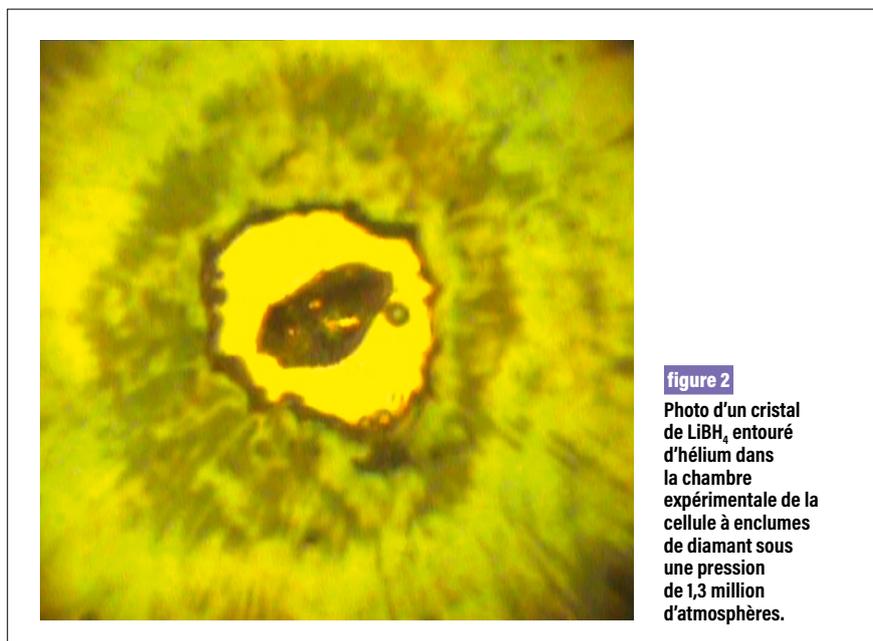
À l'aide de cellules à enclumes de diamant, l'équipe a comprimé les deux borohydrides jusqu'à environ deux millions d'atmosphères, dans les milieux transmetteurs de pression, l'hélium et l'hydrogène, afin de tester la variation de solubilité de l'hydrogène. Tout d'abord, une grande variété de structures a été découverte sous pression. Les différentes phases ne diffèrent l'une de l'autre que par la manière dont les tétraèdres $[\text{BH}_4]^-$ et les ions alcalins sont empilés les uns sur les autres, en particulier, pour LiBH_4 en dessous de 40 GPa. Mais à haute pression, les structures de LiBH_4 deviennent identiques à celles de NaBH_4 à plus basse pression.

Cela peut s'expliquer par la taille des ions alcalins Li^+ et Na^+ . C'est une manifestation de la pression chimique. Un effet de pression peut ainsi être reproduit en changeant un atome (ici en passant de Li à Na, plus volumineux).

Cependant, de façon tout à fait surprenante, le tétraèdre $[\text{BH}_4]^-$, qui est la brique élémentaire de la structure des borohydrides, est préservé jusqu'aux plus hautes pressions explorées. Ce tétraèdre est assez instable à pression ambiante puisqu'une température de 350 °C suffit pour le casser. Les calculs, basés sur l'application des principes de la mécanique quantique, confirment cette stabilité et montrent que la rupture

des liaisons bore-hydrogène qui conduit ainsi à la phase métallique ne devrait être observée que pour des pressions de plusieurs millions d'atmosphères.

Enfin, l'équipe n'a pas observé d'enrichissement significatif en hydrogène sous l'effet d'une forte pression d'hydrogène. Un nouveau composé $\text{NaBH}_4(\text{H}_2)_{0,5}$ a été calculé stable au-dessus de 100 GPa, mais sa synthèse n'a pas été concluante. Cela illustre le fait que tous les hydrides ne forment pas des superhydrides sous pression. L'obtention de ce résultat négatif est aussi riche d'enseignements pour poursuivre la recherche de nouveaux hydrides par l'exploration du domaine du possible. Cela va demander la mise en place d'un arsenal méthodologique basé sur des approches expérimentales, des calculs quantiques et de méthode d'intelligence artificielle. La présente étude a permis de valider nos outils en vue de ce travail.



RÉFÉRENCES

- 1** A. Marizy, G. Geneste, G. Garbarino, P. Loubeyre, « High pressure polymorphism of LiBH_4 and of NaBH_4 », *Royal Society of Chemistry Advances*, **11**, 25274 (2021).
- 2** H. Liu, I. I. Naumov, R. Hoffmann, N. W. Ashcroft, R. J. Hemley, « Potential high- T_c superconducting lanthanum and yttrium hydrides at high pressure », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **114**, 6990 (2017).
- 3** M. Somayazulu, M. Ahart, A. K. Mishra, Z. M. Geballe, M. Baldini, Y. Meng, V. K. Struzhkin, R. J. Hemley, « Evidence for superconductivity above 260 K in lanthanum superhydride at megabar pressures », *Phys. Rev. Lett.*, **122**, 027001 (2019).

Vers une connaissance approfondie des mécanismes microscopiques d'amorçage d'un explosif

Pour ses besoins propres, le CEA - DAM développe de nouveaux matériaux énergétiques. Ce processus est long et coûteux et nécessite de s'assurer que le risque d'explosion suite à une agression thermique, mécanique ou électromagnétique accidentelle ne rend pas le matériau inutilisable car trop dangereux. Pour cela, il est indispensable de savoir comment sa structure moléculaire affecte sa réponse à ces agressions. Le travail de longue haleine que cela suppose fait l'objet d'un ouvrage de synthèse publié par des chercheurs du CEA - DAM, en collaboration avec leurs homologues étrangers, notamment américains [1](#). Cet article se focalise sur quelques avancées récentes qui y sont rapportées.

Contrairement aux carburants, incapables de fournir de l'énergie sans apport d'oxygène, un matériau énergétique renferme une énergie chimique intrinsèque qui peut servir à propulser une fusée, mais peut aussi être libérée brutalement sous la forme d'une explosion dont le déclenchement est parfaitement maîtrisé. Cependant, différentes agressions accidentelles peuvent aussi conduire à ce résultat : élévation de température, impact, frottement, étincelle, etc. À chacune correspond un risque d'amorçage mesuré à l'aide d'un test normalisé. Les données quantitatives obtenues sont destinées avant tout à fournir des critères pratiques de dangerosité. En principe, elles pourraient aussi guider la conception d'un matériau énergétique. Cela implique toutefois de les estimer théoriquement pour de nouvelles molécules, ce qui est un vaste problème étant donné la diversité des matériaux énergétiques, des agressions à prendre en compte et des mécanismes envisageables, incluant des processus dits athermiques, c'est-à-dire sans apport de chaleur, au cours desquels la décomposition des molécules conduisant à l'amorçage est causée

directement par les contraintes appliquées plutôt que par l'élévation de température qui en résulte ([tableau 1](#)).

Les études les plus nombreuses portent sur la sensibilité à l'impact mécanique, du fait de son importance pratique. Dès le milieu du xx^e siècle, il est apparu que cette sensibilité augmente avec le contenu en oxygène du matériau. Cependant, les efforts pour identifier d'autres facteurs sont longtemps restés vains, malgré l'utilisation de techniques de modélisation toujours plus élaborées. Les premiers progrès significatifs ont été obtenus grâce à un modèle développé au CEA - DAM [[1](#), [chap. 7](#), [paragraphe 3.3](#)]. Ce dernier relie la sensibilité à la vitesse de propagation des réactions de décomposition suite à l'élévation locale de température [2](#). Cette cinétique dépend surtout des explosophores que comporte la molécule, autrement dit les groupes fonctionnels susceptibles de conférer un caractère explosif au matériau. Une fois les paramètres cinétiques propres à ces explosophores déterminés, il est possible d'estimer la sensibilité par une simple formule, très facile à utiliser. Cette méthode est désormais utilisée par la communauté internationale pour évaluer la sensibilité de matériaux virtuels [3](#), car elle permet une sélection plus pertinente des molécules à synthétiser.

Il est possible de s'affranchir des hypothèses concernant le rôle primordial des explosophores en simulant numériquement la décomposition du matériau, comme cela a été fait récemment aux États-Unis par des équipes du Los Alamos National Laboratory. Ces simulations limitées à quelques explosifs simples ne permettent pas pour l'instant de trancher sur un éventuel gain en précision sur la sensibilité estimée [[1](#), [chap. 14](#)]. Le problème de cette approche directe et ambitieuse réside dans son coût en ressources de calcul, qui la rend inadaptée pour une utilisation de routine par les concepteurs, contrairement au modèle du CEA - DAM.

Type d'agression	Mécanisme d'amorçage sans apport de chaleur
Mécanique - Impact (faible vitesse) - Onde de choc (grande vitesse) - Friction	- Réactions provoquées par des contraintes mécaniques - Transfert de l'énergie mécanique à des liaisons chimiques covalentes conduisant à leur rupture - Réactions en phase fluide entraînées par l'écrasement des cavités microscopiques
Radiative, électrique - Onde électromagnétique (lumière, laser, etc.) - Décharge électrique - Faisceau d'électrons	- Des électrons sont portés dans des états de plus haute énergie - Réactions de décomposition facilitées par un champ électrique

tableau 1

Types d'agressions et mécanismes d'amorçage sans apport de chaleur.

Néanmoins, les capacités croissantes des supercalculateurs et l'amélioration des codes de simulation permettent de prédire de plus en plus précisément la réponse microscopique aux agressions. Par exemple, des études menées dans différents laboratoires [1, chap. 12] montrent qu'en écrasant les pores présents dans tout matériau énergétique, une onde de choc intense peut éjecter dans ceux-ci des molécules qui contribuent alors à créer une phase fluide et chaude au sein de laquelle apparaissent

des tourbillons propices au déclenchement des réactions chimiques (figure 1), ce qui corrobore la relation développée au CEA – DAM entre sensibilité et cinétique de décomposition [2].

Cette relation est d'une fiabilité avérée pour prévoir le rôle de la composition chimique sur la sensibilité des explosifs constitués d'une multitude de cristaux et comportant de nombreux défauts. Par contre, elle n'explique pas le fait que la sensibilité d'explosifs qui ne seraient constitués que d'un seul cristal

dépend également de l'orientation de ce dernier par rapport à la direction d'impact. Pour comprendre cette observation expérimentale, il est nécessaire de faire appel à un modèle complémentaire qui décrit les processus causés par l'impact avant que débutent les réactions de décomposition [1, chap. 10].

En conclusion, même si beaucoup reste à faire pour identifier de manière définitive les facteurs à l'origine des sensibilités aux diverses agressions, des progrès notables ont été accomplis. Les nouvelles molécules synthétisées au cours des dernières décennies ayant été sélectionnées principalement sur la base de leurs performances théoriques, beaucoup d'entre elles ont finalement présenté une sensibilité rédhitoire vis-à-vis des possibles agressions accidentelles. Le modèle développé au CEA – DAM permet d'écarter d'emblée de telles molécules, évitant ainsi de coûteuses études expérimentales.

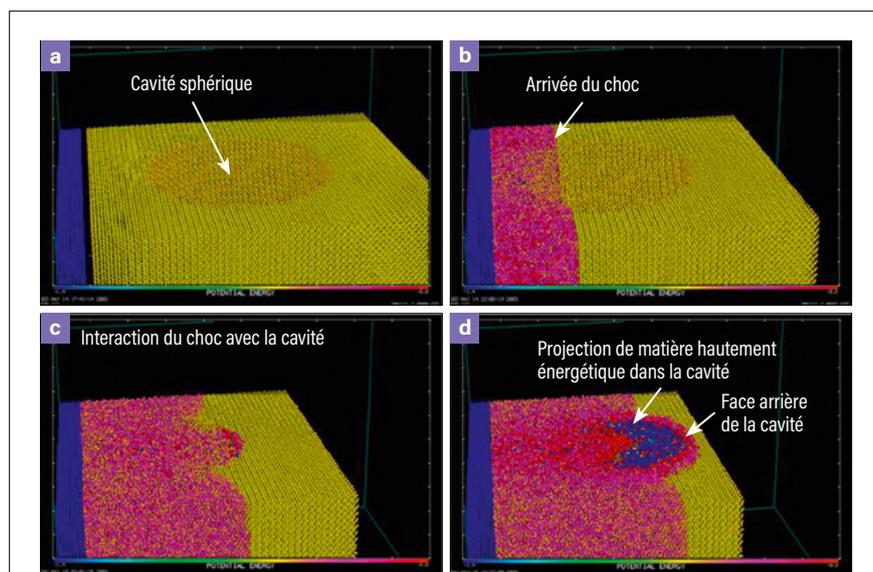


figure 1

Simulation numérique de la propagation d'une onde de choc dans une cavité sphérique avec un code de dynamique moléculaire. **a** Cavité sphérique initiale. **b** Arrivée de l'onde de choc (en rouge) dans la cavité. **c** L'onde de choc se déforme et atteint la face arrière de la cavité. **d** La matière éjectée dans la cavité lors du passage de l'onde va heurter la face arrière à grande vitesse, ce qui va ultérieurement contribuer à la formation de tourbillons facilitant l'amorçage de réactions chimiques (Crédit: J.-B. Maillet, CEA – DAM Île-de-France).

RÉFÉRENCES

- 1** D. Mathieu (Collectif, sous la dir. de), *Molecular modeling of the sensitivities of energetic materials*, Elsevier, série Theoretical and Computational Chemistry, vol. 22 (2021).
- 2** D. Mathieu, T. Alaïme, « Modélisation et prévision des sensibilités mécaniques de composés explosifs », *chocs Focus*, 5, p. 26-27 (2017).
- 3** L. Wen *et al.*, « Accelerating the search of CHONF-containing highly energetic materials by combinatorial library design and high-throughput screening », *Fuel*, 310, 122241 (2022).

G. Hallo, C. Lacombe, J. Neuport, L. Lamaignère [CEA – DAM, centre du Cesta]
F. Hild [Laboratoire de mécanique Paris-Saclay (LMPS), UMR 9026 Université Paris-Saclay,
CentraleSupélec – École normale supérieure Paris-Saclay – CNRS]

À la poursuite des cratères sur les optiques du Laser Mégajoule

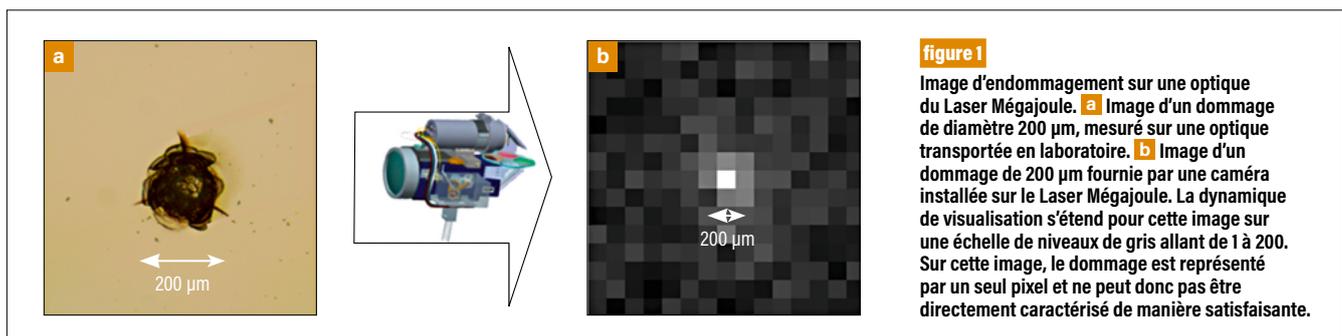
Les faisceaux du Laser Mégajoule sont si puissants qu'ils provoquent des cratères dans ses optiques. Ces cratères, aussi appelés dommages, bien qu'à peine plus larges qu'un cheveu sur des composants de la taille d'un écran d'ordinateur, sont la cause du remplacement de centaines d'optiques par an. Or, comme chaque optique est de très haute qualité et donc très chère, il est souhaitable de détecter les dommages aussi tôt que possible, de les traiter pour réparer l'optique et la réutiliser. Pour détecter les dommages, le CEA – DAM enregistre chaque jour des centaines d'images d'optiques et s'est proposé de mesurer les dommages par l'analyse d'infimes variations d'intensité lumineuse **1** : il parvient ainsi à une détection plus précoce qu'avec la méthode actuelle de mesure du diamètre **2**.

Mesurer des objets de l'épaisseur d'un cheveu à dix mètres de distance : impossible ? C'est ce dont a besoin l'un des plus grands lasers de puissance du monde – le Laser Mégajoule (LMJ), situé dans le centre CEA – DAM du Cesta, près de Bordeaux – pour fonctionner de manière nominale et mener à bien les expériences du

programme Simulation **3**. En effet, la détection fiable et précoce de l'augmentation de la taille des dommages des optiques est un des prérequis à son bon fonctionnement.

À son apparition, un dommage ressemble à un impact sur un pare-brise, à la différence que son diamètre est de l'ordre de la dizaine de micromètres. L'endommagement est dû à l'interaction entre un des faisceaux du laser et de rares défauts présents à la surface des optiques. À chaque nouvelle exposition au faisceau, le dommage s'amplifie et les fractures qui le constituent représentent des points d'absorption de l'énergie du faisceau. Malgré leur petite taille par rapport à celles des optiques, les dommages dégradent la qualité du faisceau laser. Pour que les performances de celui-ci soient conservées, un composant trop endommagé doit être remplacé.

Pour suivre l'évolution d'un dommage, des images des optiques sont enregistrées régulièrement. Mais la résolution de la caméra est insuffisante pour une mesure directe de la taille d'un dommage (**figure 1**).



Une nouvelle approche

Une nouvelle approche est proposée afin de suivre avec une plus grande précision l'augmentation de la taille des dommages **1**. Elle est basée sur l'analyse des variations d'intensité lumineuse dans chaque pixel de l'image enregistrée après le passage d'un faisceau. Pour que cette méthode soit plus efficace et plus fiable *in situ* que la mesure directe de la taille, il est nécessaire de s'assurer que les variations de luminosité ne sont provoquées que par l'évolution des dommages.

Suite à de petits déplacements de la caméra entre les acquisitions, un système de correction fait correspondre les images successives d'un dommage avec une résolution inférieure au pixel **4,1**. Une correction en brillance et contraste permet ensuite de s'assurer que la luminosité d'un même pixel est analysable sur l'ensemble des images enregistrées (**figure 2**).

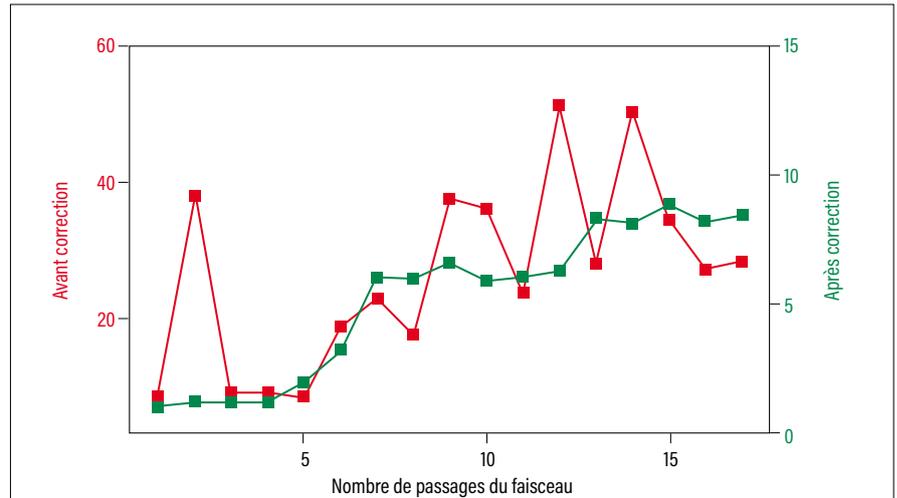


figure 2

Variation d'intensité lumineuse des pixels de la caméra, installée sur le Laser Mégajoule, sur une zone de 5 mm encadrant un dommage avant correction (points rouges) et après correction (points verts) d'une série de dix-sept images successives. L'unité de l'intensité lumineuse est ici donnée par les niveaux de gris de la **figure 1b**. Avant correction, les intensités lumineuses sont faussées par de petits déplacements de la caméra et des variations d'éclairement. Au contraire, les intensités lumineuses corrigées décrivent précisément l'augmentation de la taille du dommage.

Des performances accrues

L'équipe du CEA – DAM a comparé les performances de la mesure directe du diamètre avec celles de la mesure des intensités lumineuses lors d'expériences réalisées sur le Moyen d'endommagement laser et banc d'analyse (Melba) du centre CEA – DAM du Cesta **2**. L'analyse des intensités conduit à des performances inaccessibles par la

mesure du diamètre; de plus, le début de la croissance des dommages est détecté plus précocement (**figure 3**). Les variations d'intensité lumineuse peuvent donc être utilisées comme un indicateur efficace de la croissance des dommages laser. La recherche des cratères peut alors avoir lieu pour favoriser la bonne réalisation des expériences du programme Simulation.

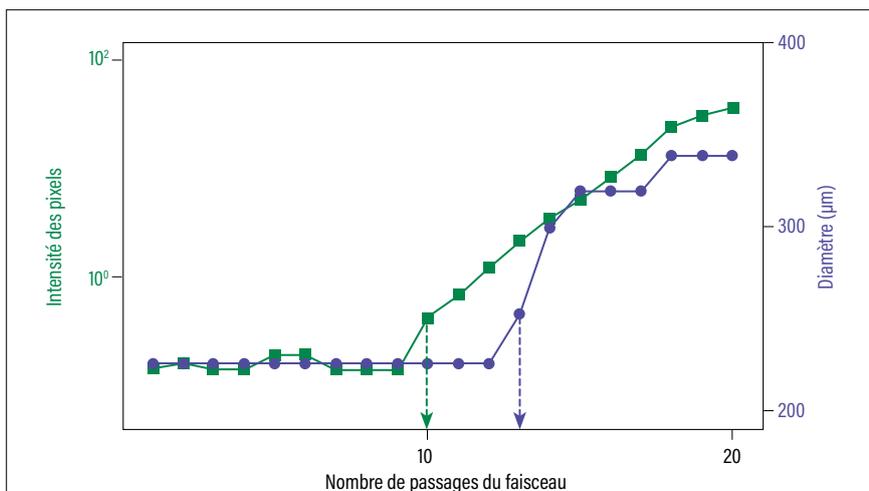


figure 3

Variation d'intensité lumineuse des pixels de la caméra (points verts) et du diamètre mesuré (points violets) lors de la croissance d'un dommage sur l'installation Melba du centre CEA – DAM du Cesta. Bien que les deux séries de données permettent d'observer la croissance, l'intensité des pixels (flèche verte) permet de détecter la croissance du dommage trois passages de faisceau plus tôt qu'en s'appuyant sur la mesure de diamètre (flèche violette). L'aspect plus progressif de l'augmentation d'intensité lumineuse est également plus fidèle à l'évolution de la croissance que les sauts et paliers observés sur la mesure du diamètre.

RÉFÉRENCES

- 1** G. Hallo, C. Lacombe, J. Neauport, F. Hild, « Detection and tracking of laser damage sites on fused silica components by digital image correlation », *Optics and Lasers in Engineering*, **146**, p. 106674 (2021).
- 2** G. Hallo, C. Lacombe, R. Parreault, N. Roquin, T. Donval, L. Lamaignère, J. Neauport, F. Hild, « Sub-pixel detection of laser-induced damage and its growth on fused silica optics using registration residuals », *Optics Express*, **29**, p. 35820-35836 (2021).
- 3** Collectif du CEA - DAM, « Les 20 ans du programme Simulation : histoire d'un succès ! » (2016).
- 4** M. A. Sutton, J.-J. Orteu, H. W. Schreier, *Image correlation for shape, motion and deformation measurements - Basic concepts, theory and applications*, Springer Science, p. 81-118 (2009).

N°16 / OCTOBRE 2022

CHOCES AVANCÉES

Bilan 2021 des publications
et de la vie scientifique
de la Direction des
applications militaires



À PARAÎTRE

REVUE CHOCES N° 52

Calcul haute performance -
En route vers l'exascale

N°16 / OCTOBRE 2022

CHOCES AVANCÉES



BILAN 2021 DES PUBLICATIONS ET DE LA VIE SCIENTIFIQUE
DE LA DIRECTION DES APPLICATIONS MILITAIRES

www-dam.cea.fr