

chocs

avancées

2006

Avancées scientifiques et techniques de la Direction des applications militaires



S O M M A I R E

■ Éditorial	1	■ 9 Les instabilités plasmas : un enjeu pour le LMJ	25
Alain Delpuech		C. Rousseaux, L. Grémillet, S. Baton	
■ 1 Au cœur des actinides	3	■ 10 Succès des premières expériences ouvertes sur la LIL	28
H. Goutte		G. Schurtz	
■ 2 L'oxygène sous pression fait le grand 8	6	■ 11 La Ligne d'Intégration Laser (LIL)	31
G. Weck, P. Loubeyre		A. Roussel	
■ 3 Le Pu stabilisé par un soupçon d'Am	9	■ 12 Des nanocavités créées par laser	33
N. Baclet, P. Faure, F. Delaunay		L. Hallo, A. Bourgeade, V. T. Tikhonchuk, P. Nicolai	
■ 4 Le cérium, un cristal sensible à l'entropie	12	■ 13 De remarquables couches minces nanostructurées	36
B. Amadon		P. Belleville, K. Vallé, P. Prené	
■ 5 Des bulles qui font vieillir	15	■ 14 Événements parasites dans des circuits sous irradiation	39
A. Fabre, J. Demoment, S. Contreras, S. Thiébaud		V. Ferlet-Cavrois, P. Paillet, J. Baggio	
■ 6 Un capteur chimique de gaz	18	■ 15 Calculs d'infrasons sur TERA 10	42
P. Montméat, F. Parret, L. Hairault, P. Prené		B. Després, H. Jourden, P.-F. Piserchia, O. Gainville	
■ 7 Un laser à l'assaut de la stratosphère	20	■ 16 Sumatra, deux ans après	45
S. Champeaux, L. Bergé, S. Skupine		J. Guilbert, H. Hébert	
■ 8 Modélisation des instabilités dans les plasmas du futur LMJ	23	■ Livres parus en 2005 et 2006	47
P. Loiseau, O. Morice, D. Teychenné, M. Casanova, S. Hüller, D. Pesme		■ Soutenances HDR en 2005 et 2006	

ÉDITORIAL

Depuis près de quinze années, la revue **chocs** permet à ses lecteurs de se familiariser avec les thématiques scientifiques de la Direction des applications militaires du CEA.

Nous avons décidé de consacrer, une fois par an, un numéro spécial de cette revue, à une rétrospective de quelques uns des faits scientifiques les plus marquants et des principales publications réalisées par les chercheurs du CEA - DAM au cours de l'année écoulée. **chocs avancées 2006** est donc le premier numéro de cette nouvelle formule.

Nous avons mis en avant des travaux qui, par leur qualité scientifique et par leur portée, nous semblent révélateurs de l'ouverture du CEA - DAM et de l'excellence des recherches qui y sont faites.

Après l'arrêt définitif des essais nucléaires en 1996, le CEA - DAM a développé le Programme Simulation, qui consiste à reproduire par le calcul les différentes phases du fonctionnement d'une arme nucléaire. Il a fallu passer d'une connaissance des phénomènes physiques, validée a posteriori par un tir, à une capacité de prévision, nécessitant une grande maîtrise des sciences mises en jeu. Éléments clés du Programme Simulation, les moyens numériques TERA, et les moyens expérimentaux comme la Ligne d'Intégration Laser (LIL) et, plus tard, le Laser Mégajoule (LMJ) constituent des réalisations exceptionnelles par leurs caractéristiques techniques et leurs performances.

La DAM se doit aussi d'être à la pointe des disciplines nécessaires à la surveillance des traités liés aux contrôles des essais nucléaires et de la non-prolifération.

Les grandes installations : un élément clé du Programme Simulation



La machine TERA 10

Pour répondre aux défis du Programme Simulation, les concepteurs, physiciens et chercheurs du CEA - DAM doivent disposer d'une capacité de calcul 10 000 fois supérieure à celle dont ils disposaient au moment des essais nucléaires. La machine TERA 10, qui a été réceptionnée au CEA - DAM - Île-de-France fin 2005, multiplie par 1 000 cette puissance de calcul. Elle est actuellement l'une des machines les plus puissantes au monde, et place ainsi la France dans le peloton de tête en matière de simulation numérique haute performance.

Installée sur le site de Moronvilliers, en Champagne, la machine de radiographie Airix permet de valider les modèles relatifs à la phase non nucléaire du fonctionnement d'une arme. Depuis 2000, Airix apporte des résultats essentiels aux équipes de concepteurs.



L'installation Airix



Introduction de la chambre d'expériences du LMJ (CEA/Philippe Laberguerie)

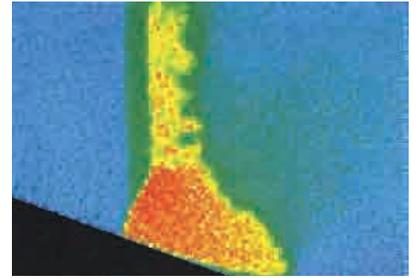
Le LMJ est l'outil de validation de la phase nucléaire du fonctionnement des armes. Ses faisceaux convergeront sur une cible de quelques millimètres de diamètre, pour obtenir la fusion nucléaire d'un mélange de deutérium et de tritium. Les travaux de construction du bâtiment qui abritera cette installation sur le centre du CEA - Cesta, près de Bordeaux, se poursuivent en vue d'une mise en fonctionnement au début de la prochaine décennie. La LIL, prototype du LMJ, fonctionne depuis 2002 et est ouverte aux collaborations avec la communauté scientifique nationale et internationale. La LIL est aujourd'hui et restera le laser le plus puissant en Europe, en terme d'énergie délivrée, jusqu'à l'entrée en service du LMJ qui deviendra, au début de la prochaine décennie, avec le NIF (National Ignition Facility) américain, le laser le plus puissant au monde.

Une politique d'ouverture des grandes installations

Dans le cadre de sa politique d'ouverture, le CEA a souhaité mettre ces installations exceptionnelles à la disposition de la communauté scientifique européenne. Les deux axes principaux de cette action d'envergure débutée en 2002 sont le projet **TER@TEC** en Île-de-France, et le projet **Route des Lasers** en région Aquitaine.

Le projet TER@TEC

Ter@tec est une structure d'échanges et de collaborations entre les différents acteurs de la simulation numérique haute performance : chercheurs, entreprises de l'informatique, et industriels. Créé par le CEA et les collectivités territoriales, Ter@tec rassemble aujourd'hui une quarantaine de partenaires. La simulation haute performance et le calcul intensif sont un enjeu stratégique qui permet à la recherche de faire progresser les grands challenges scientifiques et techniques, et à l'industrie d'accroître sa compétitivité en concevant, développant, et optimisant plus rapidement de nouveaux produits. Ter@tec répond à cet enjeu, dans des domaines aussi divers que l'électronique, l'aéronautique, la sûreté des réacteurs nucléaires, l'évolution du climat ou le comportement des matériaux. Ter@tec est intégré au pôle de compétitivité "System@tic Paris-Région" consacré aux logiciels et systèmes complexes.



Mise en évidence d'une onde de Mach dans la simulation du front de détonation d'un explosif. Soulard et al. (CEA - DAM).



Le laser Alisé

Le projet "Route des lasers"

La "Route des lasers" permet à la communauté scientifique d'accéder aux installations lasers du CEA. Ces grands lasers de puissance vont permettre d'étendre le domaine de la physique accessible en laboratoire, et d'explorer de nouveaux champs de recherche. Ils intéressent en particulier les chercheurs de la physique des très hautes températures et des très hautes densités. Ils constituent, en effet, un moyen unique pour simuler des phénomènes qui se manifestent sous des conditions extrêmes comme celles qui se rencontrent dans les étoiles (protoétoiles ou supernovæ) ou dans les noyaux planétaires (milieux chauds et denses).

Les collaborations entre le CEA, l'université de Bordeaux 1, le CNRS et l'École polytechnique se sont concrétisées par la création, début 2003, de deux entités : l'UMR (Unité Mixte de recherche) CELIA et l'Institut des Lasers et Plasmas. Le CELIA est une structure régionale de recherche d'une soixantaine de chercheurs du CEA, de l'Université, et du CNRS travaillant dans les domaines des plasmas denses et chauds, et de l'optique et des lasers. L'Institut des Lasers et Plasmas est une structure de coordination nationale rassemblant à ce jour 27 laboratoires français. Point d'entrée des organismes scientifiques pour mener des expériences "ouvertes" sur la LIL et le LMJ, l'ILP organise le recueil et l'évaluation des propositions d'expériences issues de ses chercheurs et de la communauté extérieure. Les premières expériences ouvertes sur la LIL ont été réalisées fin 2005 et certaines sont évoquées dans ce numéro.

L'ouverture renforce la crédibilité de la DAM

L'ouverture de la DAM est aujourd'hui une réalité ancrée à la fois dans ses programmes et dans ses structures. Ses ingénieurs et chercheurs sont au cœur de cette dynamique. Par leur contribution au rayonnement scientifique du CEA - DAM, ils renforcent sa crédibilité scientifique et technique. En parcourant les pages de ce premier numéro de **chocs avancées 2006**, le lecteur percevra la grande diversité des thèmes de recherche abordés dans ses laboratoires, l'engagement et la qualité de ses chercheurs. Comme le rappelait le Président de la République lors de sa visite au Centre CEA - DAM - Île-de-France en septembre 2006, "Le rang des nations n'est jamais assuré. Au XXI^e siècle, seules resteront en tête celles qui feront de la science une authentique priorité. [...] C'est la mission que j'assigne au CEA et notamment à la DAM afin qu'il continue à assurer la crédibilité de notre dissuasion et à participer au développement et au rayonnement mondial de la science française."



Alain Delpuech
 Directeur des applications militaires du CEA

AU CŒUR DES ACTINIDES

H. Goutte
CEA - DAM - Île-de-France

Les processus nucléaires comme la fusion ou la fission génèrent un dégagement d'énergie important. Pour la fission, cette énergie dépend des propriétés du noyau qui va se casser. Seuls les noyaux lourds favorisent ce mode de décroissance car ils ont un nombre important de protons et, de ce fait, la forte répulsion électrostatique interne génère la déformation puis la scission du noyau en deux noyaux plus petits. Pour comprendre en détail ce phénomène, il est nécessaire de prédire la structure des noyaux lourds et de suivre théoriquement leur évolution depuis leur état fondamental jusqu'aux déformations extrêmes précédant la rupture.

Dernièrement, les théoriciens en physique nucléaire du CEA - DAM - Île-de-France ont obtenu deux succès importants [1] [2] dans le cadre de théories microscopiques appliquées à des noyaux de la famille des actinides (éléments ayant plus de 90 protons).

Le premier article présente une étude exhaustive des caractéristiques de 55 actinides pair-pair [1]. Le deuxième étudie l'évolution de l'isotope 238 de l'uranium depuis son état fondamental jusqu'à la fission [2]. Dans ces théories, les seuls ingrédients sont la force que ressentent deux nucléons au sein du noyau, et les lois de la mécanique quantique. Une des seules expressions de cette force est la force dite "de Gogny" développée au CEA - DAM, il y a maintenant trente ans.



La fission est un processus intervenant dans de nombreuses applications tant militaires que civiles, telles que la production d'énergie ou le retraitement des déchets du cycle électronucléaire. Les caractéristiques de la fission rentrent directement dans les programmes de simulation, en particulier la probabilité qu'elle ait lieu (*section efficace*), ou les propriétés des fragments, responsables, entre autres, du nombre de neutrons émis. Pour cela, les mesures expérimentales sont indispensables mais elles ne couvrent pas le champ complet des données nécessaires. Une modélisation reste incontournable.

D'un point de vue théorique, la fission apparaît comme un processus complexe qui met en jeu de nombreuses propriétés nucléaires. D'une part, il s'agit d'un mouvement de grande amplitude avec un réarrangement complet de la structure interne du noyau. D'autre part, plusieurs types de déformations sont à prendre en compte simultanément : la déformation axiale, pour rendre compte de l'élongation du système ; l'asymétrie de masse qui seule explique la cassure privilégiée en un petit et un gros fragment ; et la striction (*formation d'un col*), qui permet au noyau père de se scinder en deux noyaux fils. Les effets dynamiques et quantiques régissent l'évolution du système tout au long du processus. Cette complexité a empêché l'aboutissement d'un modèle standard de la fission, malgré soixante-dix ans de travaux sur le sujet.

La complexité de la fission a empêché l'aboutissement d'un modèle standard, malgré plus de soixante-dix ans de travaux sur le sujet

Parmi les différentes approches tentant de décrire le processus de fission, les méthodes dites "microscopiques" sont les plus à même de faire des prévisions. Elles sont essentielles pour les noyaux pour lesquels il n'existe pas de données expérimentales, et pour réduire la phénoménologie introduite dans les programmes de simulation. Des avancées significatives ont été réalisées ces dernières années, en particulier au CEA - DAM - Île-de-France, où les théoriciens ont décrit la structure de nombreux actinides, ainsi que les distributions en masse des fragments issus de la fission d'un isotope de l'uranium, en utilisant comme seul ingrédient l'interaction entre les nucléons.

Structure des noyaux pères

Dans un premier travail portant sur 55 actinides pairs-pairs, des prévisions ont été faites, notamment sur les isomères de forme et sur leur temps de vie. Les énergies d'excitation des isomères sont montrées sur la figure 1. Un bon accord entre les prédictions (symboles bleus) et les données expérimentales (symboles rouges) existe pour les isotopes de thorium, uranium, plutonium et curium.

Nous prévoyons, de plus, une décroissance globale des énergies des isomères quand la masse du noyau fissionnant augmente. Les états superdéformés sont même trouvés plus bas en énergie que les états normalement déformés dans les noyaux $^{242,244}\text{Fm}$ et ^{250}No .

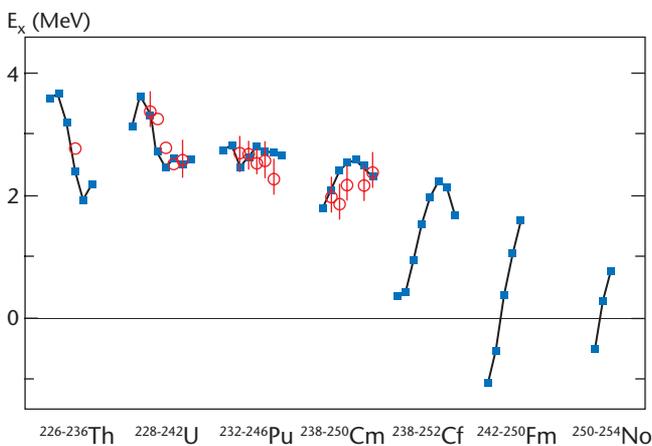


Figure 1 Énergie d'excitation des isomères de forme par rapport à l'énergie de l'état normalement déformé.

Toutefois, comme ces états sont situés seulement quelques centaines de keV sous la barrière octupolaire (associée à une asymétrie non nulle) ils ne doivent probablement pas survivre comme états liés.

Les temps de vie de décroissance de ces isomères par "gamma back decay" (retour dans le premier puits, suivi par l'émission d'un gamma), et par fission ont été déterminés : les isomères de forme dans les isotopes de thorium et d'uranium décroissent par émission gamma, alors que la fission et le "gamma back decay" sont en compétition dans les noyaux de plutonium et de curium. Par contre, ses isomères décroissent par fission pour les californium, curium et nobelium. Ces prédictions mettent en évidence des effets de structure importants entre actinides voisins, et prouvent l'importance des calculs microscopiques dans cette région de masse.

Fission en deux noyaux fils

Dans une autre étude nous avons décrit les distributions des noyaux produits par fission en prenant en compte toute la dynamique du processus dans une approche cohérente, microscopique, et dépendante du temps. Nous employons un formalisme à deux étapes : les propriétés statiques du système fissionnant (énergie potentielle et inerties collectives) sont déterminées, avant de servir de base pour l'étude de la dynamique du processus.

La surface d'énergie potentielle obtenue dans le noyau ^{238}U est montrée sur la figure 2 en fonction de l'élongation et de l'asymétrie. Nous notons que les premier et second puits sont associés à des formes symétriques, tandis que le degré de liberté d'asymétrie est important à plus grande élongation, puisque la vallée asymétrique se trouve à une énergie plus basse que la vallée symétrique.

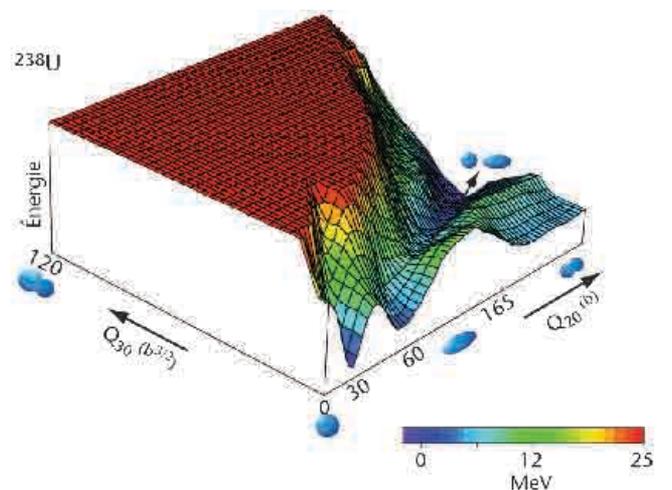


Figure 2 Surface d'énergie potentielle de ^{238}U en fonction des variables collectives d'élongation (Q_{20}) et d'asymétrie (Q_{30}), depuis l'état fondamental jusqu'à la scission.

Nous avons ensuite propagé un état initial de fission induite par neutrons dans une telle surface. Les distributions en masse des fragments sont déterminées à partir du flux de la fonction d'onde le long de la ligne de scission, définie comme l'ensemble des points où, pour chaque fragmentation, le système se scinde en deux. Ces résultats (*en bleu*) sont comparés sur la figure 3 à des mesures (*en rouge*) et à des résultats que nous avons obtenus à partir de calculs purement statiques (*en noir*). Cette figure montre, notamment, que les maxima des distributions sont déterminés par les propriétés statiques dans la région de la scission, tandis que les effets dynamiques sont essentiels pour obtenir des largeurs en accord avec les données expérimentales.

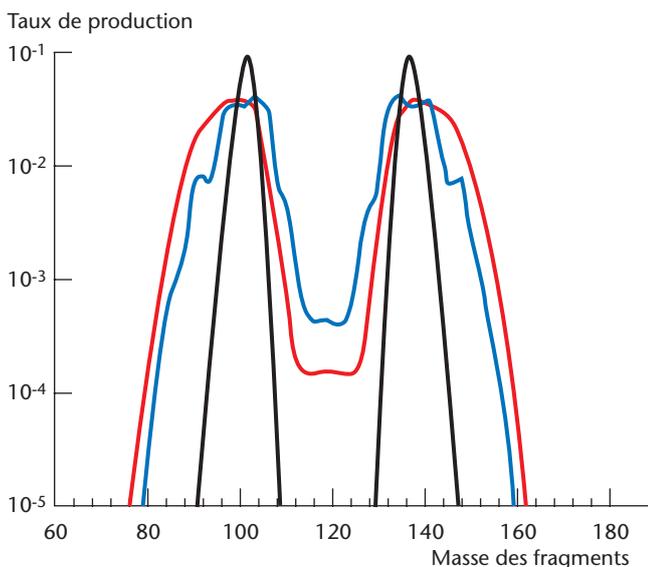


Figure 3
Distributions en masse des fragments issus de la fission de ^{238}U , obtenues par des calculs dynamiques (*en bleu*) et statiques (*en noir*), comparées aux données évaluées (*en rouge*).

Les résultats montrés ici représentent une première étape dans la description entièrement microscopique du processus de fission depuis les caractéristiques du père jusqu'aux propriétés des fils. Le bon accord obtenu avec les résultats expérimentaux nous encourage à continuer les développements théoriques. Nous projetons, dans un premier temps, de caractériser plus finement les fragments émis en définissant leur déformation et leur énergie d'excitation. Ces calculs n'auraient pas été possibles sans l'augmentation de la puissance des ordinateurs.

Ces études seront complétées par des travaux expérimentaux sur le complexe accélérateur du GANIL (*Caen*), en particulier avec l'arrivée de *Spiral 2* vers 2010, un accélérateur de produits de fission.

Ces travaux théoriques seront complétés par des expériences sur *Spiral 2* dans les années à venir

Malgré ces avancées importantes, saluées par la communauté internationale, ces calculs ne remplacent pas, pour le moment, les évaluations faites sur la base de modèles phénoménologiques. Cela reste un des défis majeurs pour la physique nucléaire dans la décennie à venir.

Références

- [1] J.-P. DELAROCHE, M. GIROD, H. GOUTTE, J. LIBERT, "Structure properties of even-even actinides at normal and super deformed shapes analysed using the Gogny force", *Nuc. Phys. A* **77**, **1**, p. 103-168 (2006).
- [2] H. GOUTTE, J.-F. BERGER, P. CASOLI, D. GOGNY, "Microscopic approach of fission dynamics applied to fragment kinetic energy and mass distributions in ^{238}U ", *Phys. Rev. C* **7**, **1**, p. 024316 (2005).

L'OXYGÈNE SOUS PRESSION FAIT LE GRAND 8

G. WECK, P. LOUBEYRE
CEA - DAM - Île-de-France

Parmi les molécules simples, la molécule de di-oxygène O_2 est la seule qui possède un moment magnétique. L'oxygène solide présente une grande diversité de structures dont la stabilité est gouvernée par l'interaction magnétique. À très haute pression, l'oxygène solide devient un métal aux températures ambiantes, et un supraconducteur à basse température. Dans un grand domaine de pression entre le domaine magnétique et le régime métallique, l'oxygène solide possède des propriétés surprenantes : il a une couleur rouge et une forte absorption dans l'infrarouge. La structure de cette phase intermédiaire était inconnue malgré de nombreuses études expérimentales et théoriques. En faisant croître un monocristal d'oxygène dans cette phase, sous pression et dans l'hélium, nous avons obtenu de très bonnes données de diffraction X. Nous avons pu voir la structure de cette molécule : cette phase est due à une association moléculaire de quatre molécules O_2 en unité rhomboédrique. Il s'agit de la première formation d'une nouvelle molécule par la seule compression.

Le solide d'oxygène peut être obtenu soit à basse température ($T < 55 K$), soit à haute pression ($P > 5,4 GPa$). Comme pour d'autres molécules simples ($H_2, N_2, Br_2, etc.$), ou pour les gaz rares (He, Ne, Xe), la stabilisation des différentes phases solides est due à une interaction très faible appelée interaction de *Van der Waals*. Cette interaction ne peut pas être considérée comme une liaison chimique car les électrons restent localisés sur leurs atomes. Elle ne permet pas de stabiliser une phase solide aux conditions ambiantes de température et de pression. Les solides dits "de *Van der Waals*", obtenus sous pression, disparaissent dès lors que cette dernière est relâchée. La molécule d'oxygène présente, par ailleurs, la particularité unique de posséder un moment de spin $S = 1$, dû à la présence de 2 électrons non appariés sur les orbitales moléculaires $\pi^*(2p_x, 2p_y)$. La compétition entre les interactions magnétiques résultantes et la force de *Van der Waals* est à l'origine d'un diagramme de phase étonnamment riche (figure 1). L'étude de ce diagramme de phases a commencé en 1920. Quatre arrangements cristallins ont jusqu'à présent été caractérisés. Les phases α , β et γ existent à pression ambiante et basse température. Sous haute pression et à température ambiante (295 K), l'oxygène cristallise dans la phase β à 5,4 GPa. En augmentant la pression, l'oxygène devient orange à 9,6 GPa (phase δ), cette phase restant stable jusqu'à 10 GPa. À l'exception de la phase γ , les différents allotropes de l'oxygène présentent des structures

en couche dans lesquelles les molécules sont alignées perpendiculairement à ces couches. Ces différents arrangements cristallins conduisent, de par le moment magnétique de la molécule d'oxygène, à différents ordres magnétiques. Ainsi, les phases α et δ sont antiferromagnétiques (ordre à longue distance des moments de spin), la phase β est ferrimagnétique (ordre à courte distance), et la phase γ est paramagnétique (pas d'ordre magnétique).

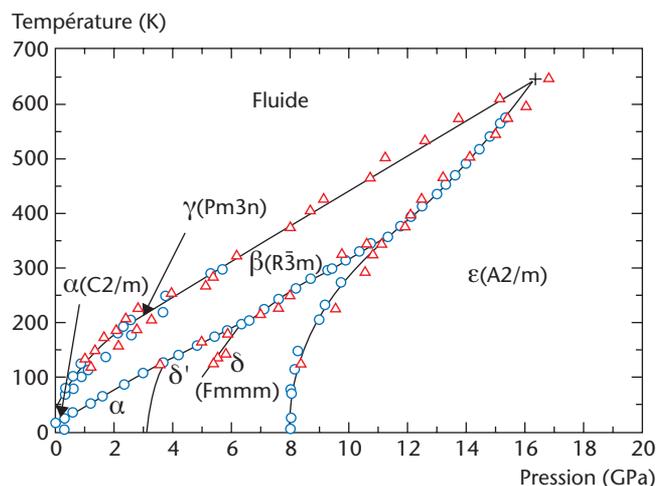


Figure 1
Diagramme de phase en pression et en température de l'oxygène dense

Au dessus de 10 GPa, l'oxygène subit une nouvelle transition. Le solide devient alors rouge foncé, et le cristal se casse brutalement. Cette nouvelle phase, appelée ϵ - O_2 , fut observée pour la première fois en 1979 grâce à la technique de la cellule à enclume de diamant. De nombreuses études furent menées pour caractériser précisément ses propriétés. Elles mirent en évidence l'apparition d'une bande d'absorption infrarouge, généralement interdite pour une molécule diatomique homo-nucléaire, la présence de nouveaux modes Raman (l'absorption infrarouge et la diffusion Raman sont deux méthodes spectroscopiques utilisées pour caractériser la manière dont les atomes vibrent à l'intérieur d'un édifice (molécule ou cristal)), et finalement la disparition du caractère magnétique du solide. L'ensemble de ces travaux semblait donc indiquer une forte redistribution de charge dans le solide, et plusieurs hypothèses, comme la formation de molécules O_4 , furent proposées pour interpréter ces résultats. Néanmoins, seule une détermination précise des positions atomiques dans le solide devait permettre d'élucider le mystère de la phase ϵ .

Afin de répondre à cette question, une équipe du CEA - DAM - Île-de-France, en collaboration avec des chercheurs de l'université d'Edinburgh, ont réussi à faire croître des cristaux d'oxygène dans l'hélium à 17 GPa et 450 K (figure 2) [1]. Des expériences de diffraction de rayons X effectuées sur ces monocristaux d'oxygène ont permis de déterminer, de manière précise, la structure de la phase ϵ (figure 3). Celle-ci ressemble, à première vue, aux structures des phases α , β et δ puisque les molécules sont disposées sur des plans moléculaires et alignées perpendiculairement à ces plans. Mais contrairement aux précédentes structures, les distances entre les molécules à l'intérieur des plans ne sont pas toutes égales, et il est possible d'identifier une association de quatre molécules O_2 pour former un ensemble $(O_2)_4$ de forme rhomboédrique (symétrie D_{2h}). À l'intérieur de ces molécules, chaque unité O_2 a 2 voisins à une distance de 2,18 Å, tandis que la distance la plus courte entre 2 molécules O_8 est de 2,57 Å.

Pour confirmer le caractère moléculaire de l'espèce O_8 , nous avons effectué des mesures de spectroscopie Raman couplées à des calculs de chimie quantique. Les simulations prédisent la présence de 4 modes Raman, dont 3 avaient déjà été observés à 161 cm^{-1} , 342 cm^{-1} et 1 600 cm^{-1} . Le quatrième mode, vers 1 380 cm^{-1} , est une signature de la molécule O_8 . Il n'a jusqu'à présent jamais été observé, peut-être parce qu'il est très proche du signal des enclumes diamants. Des mesures Raman effectuées sur différents monocristaux ont mis en évidence l'apparition à 33 GPa d'un pic très faible à 1 430 cm^{-1} , comme indiqué sur la figure 2. La faible intensité du pic est attribuée au fait que les molécules vibrent en opposition de phase.

La molécule O_8 n'avait jamais été observée précédemment. Néanmoins, nous connaissions déjà, dans le gaz et dans le liquide, le dimère $(O_2)_2$ apparaissant avec une distance d'équilibre entre 2 molécules O_2 parallèles de 3,5 Å. En 1964, Pauling proposait que la formation d'un tel dimère corresponde à l'apparition d'une liaison chimique faible dont l'origine est l'interaction d'échange entre unités O_2 . Cette interaction provient en fait des électrons issus des orbitales π^* . Par analogie, la formation des molécules $(O_2)_4$ peut être expliquée par l'appariement des électrons issus de ces mêmes orbitales $\pi^*(2p_x, 2p_y)$.

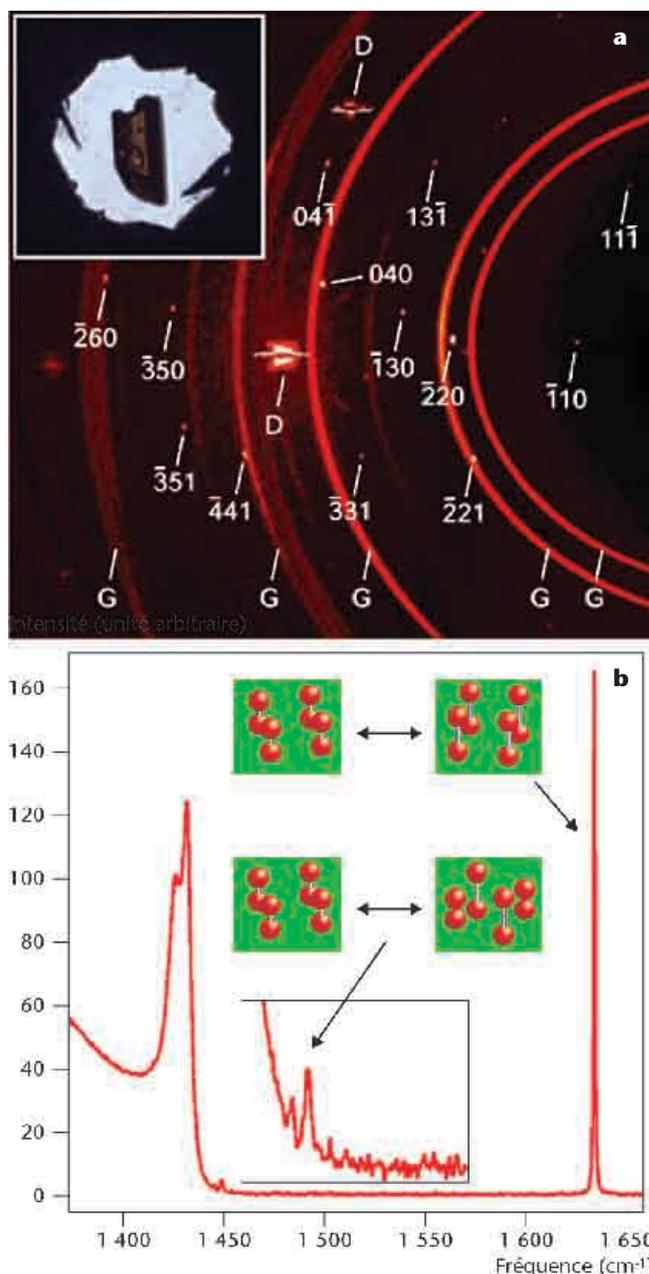


Figure 2
 Diffraction de rayons X et mesures Raman sur ϵ - O_2 .
a Ensemble de 13 images additionnées montrant les pics de Bragg indexés pour la phase ϵ . La diffraction du joint métallique et les pics du diamant sont marqués respectivement G et D.
b Spectre Raman de l'oxygène dans la phase ϵ à 33 GPa présentant les 2 modes de vibration de la molécules $(O_2)_4$. Les mouvements des atomes correspondant à chacun des pics sont représentés.

Nous obtenons alors 8 orbitales moléculaires, 4 liantes et 4 anti-liantes, pour la molécule O_8 . Les 8 électrons peuvent occuper les 4 orbitales liantes et la molécule O_8 se trouve alors dans un état singulet ($S = 0$), ce qui explique la disparition du magnétisme dans la phase ε .

La formation de O_8 est le premier exemple dans lequel la compression conduit à l'apparition d'une nouvelle molécule simple, qui n'était ni observée ni prédite auparavant. Cette formation met en évidence l'importance de l'interaction entre électrons issus des orbitales moléculaires π^* , d'une part pour l'oxygène, mais aussi pour l'ensemble des éléments appartenant à la même colonne dans le tableau périodique. Elle laisse aussi penser qu'une nouvelle chimie de l'oxygène, avec d'autres éléments légers comme N_2 , CO , C est possible sous pression, comme cela a déjà été montré avec la formation des composés $(N_2)_3(O_2)$ et $(N_2)(O_2)_2$ [2]. Finalement, nous savons que l'oxygène métallise à 96 GPa (près de 1 million de fois la pression atmosphérique), et que le métal reste constitué d'entités O_2 . Mais de nouvelles associations moléculaires $(O_2)_n$ sont sans doute possibles à ces pressions extrêmes.

Références

- [1] L. F. LUNDERGAARD, G. WECK, M. I. McMAHON, S. DESGRENIERS, P. LOUBEYRE, "Observation of a O_8 molecular lattice in the ε phase of solid oxygen", *Nature*, **443**, p. 201 (2006).
- [2] D. SIHACHAKR, P. LOUBEYRE, "High pressure transformation of N_2/O_2 mixtures in ionic compounds", *Phys. Rev. B*, **74**, p. 064113 (2006).

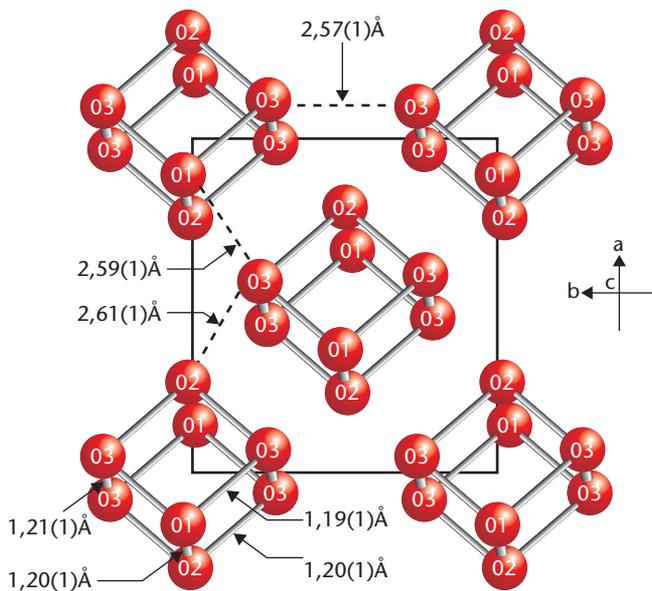


Figure 3
Géométrie et arrangement des molécules O_8
dans la phase ε à 17,6 GPa.
Un seul plan moléculaire est représenté.

LE Pu STABILISÉ PAR UN SOUPÇON D'Am

N. BACLET, P. FAURE, F. DELAUNAY
CEA - Valduc

Le plutonium reste l'élément le plus complexe de la classification périodique, et possède, à la pression atmosphérique, six phases allotropiques, de la température ambiante à sa température de fusion (640 °C). Nous nous intéressons à la phase δ , cubique à faces centrées, qui peut être stabilisée à température ambiante par l'ajout de gallium, d'aluminium, de cérium ou d'américium, par exemple. Comprendre les propriétés physiques des alliages de plutonium stabilisés en phase δ exige de caractériser finement la structure électronique de ceux-ci, et, plus particulièrement, le comportement des électrons 5f.

Jusqu'à présent, les études ont été consacrées essentiellement aux alliages PuGa et PuAl, qui possèdent un mode de stabilisation de la phase δ analogue, mais très peu de travaux ont été consacrés aux alliages PuAm, plus difficiles à mettre en œuvre du fait du caractère irradiant de ^{241}Am . Ces alliages présentent pourtant un très grand intérêt, dans la mesure où l'atome d'américium étant plus gros que celui de plutonium, le mécanisme de stabilisation de la phase δ doit être différent. Dans le cadre d'une collaboration entre le CEA - Valduc et l'Institut des Transuraniens de Karlsruhe (Allemagne), une série d'alliages PuAm, stabilisés en phase δ , a été caractérisée au niveau de la structure cristalline et de la structure électronique, en mettant en œuvre différentes techniques pointues. Le couplage de l'ensemble de ces techniques suggère une localisation partielle plus importante des électrons 5f du plutonium pour des teneurs en américium supérieures à 36 atomes %.

Par ailleurs, contrairement aux autres alliages stabilisés en phase δ (PuGa, PuAl, PuCe), l'alliage PuAm est extrêmement stable à basse température, mais présente, sous pression, un comportement analogue aux alliages PuGa, avec des transformations de phase pour des pressions relativement faibles, de l'ordre de 0,5 à 1 GPa pour les basses teneurs en américium.



La série des actinides, à laquelle appartient le plutonium, peut être décomposée en deux sous-séries qui se distinguent par leurs électrons 5f. Les actinides légers, du thorium au neptunium, possèdent des électrons 5f dits "itinérants", qui participent à la liaison métallique, alors que les électrons 5f caractéristiques des actinides lourds, de l'américium au californium, restent localisés. Le plutonium occupe une position charnière au sein de cette série, ce qui lui confère des propriétés physiques exceptionnelles, parmi lesquelles l'existence de six phases allotropiques à pression ambiante, de la température ambiante à la fusion (figure 1).

Nous nous intéressons essentiellement à la phase δ du plutonium, cubique à faces centrées, qui est stable de 319 °C à 451 °C pour le plutonium pur, mais qui peut être stabilisée à température ambiante grâce à l'ajout de quelques pour cent atomiques d'éléments dits "deltagènes" tels que le gallium, l'aluminium, le cérium, ou encore l'américium.

Une structure électronique particulière

Des travaux récents ont été menés sur des alliages PuAm dans le but, d'une part, de comprendre les mécanismes de stabilisation de la phase δ dans ce type d'alliage, et, d'autre part, de quantifier le degré de stabilité de la phase δ dans ces alliages.

Une série d'alliages *PuAm* (5, 8, 15, 20, 24 et 43 atomes % d'américium) a été élaborée par l'Institut des Trans Uraniens (ITU). Une caractérisation par diffraction des rayons X a confirmé que tous les alliages étaient monophasés, en phase δ . Caractériser précisément la structure électronique de ces alliages a exigé la mise en œuvre de différentes techniques pointues, à la fois à l'ITU (*mesure de chaleur spécifique, spectrométrie de photoémission*) et au CEA - Valduc (*mesures de résistivité électrique, et de susceptibilité magnétique à basse température*). Le caractère radioactif et irradiant des échantillons étudiés a ajouté une contrainte supplémentaire, conduisant à l'utilisation de confinements spécifiques.

Les mesures de chaleur spécifique sont difficiles à exploiter finement, du fait de l'auto échauffement des échantillons, qui n'a pas permis de réaliser les mesures à basse température (4 K), comme cela est effectué habituellement pour ce type d'expérience sur des échantillons non radioactifs. Les mesures de résistivité électrique et de susceptibilité magnétique à basse température (293 K à 7 K), méthodes indirectes de caractérisation de la structure électronique, révèlent que l'ajout d'américium conduit uniquement à une faible perturbation de la structure électronique des atomes de plutonium pour des teneurs en américium inférieures à 28 atomes %. La caractérisation directe, par spectrométrie de photoémission (XPS et UPS) suggère une localisation partielle plus importante des électrons $5f$ des atomes de plutonium pour des teneurs en américium supérieures à 36 atomes % [1]. Ces résultats indiquent que le mode de stabilisation de la phase δ dans les alliages *PuAm* est très différent de celui rencontré dans les alliages *PuGa* ou *PuAl*, largement étudiés. Il était donc intéressant de déterminer dans quelle mesure cette différence sur la structure électronique pouvait avoir des conséquences sur la stabilité de la phase δ dans les alliages *PuAm*.

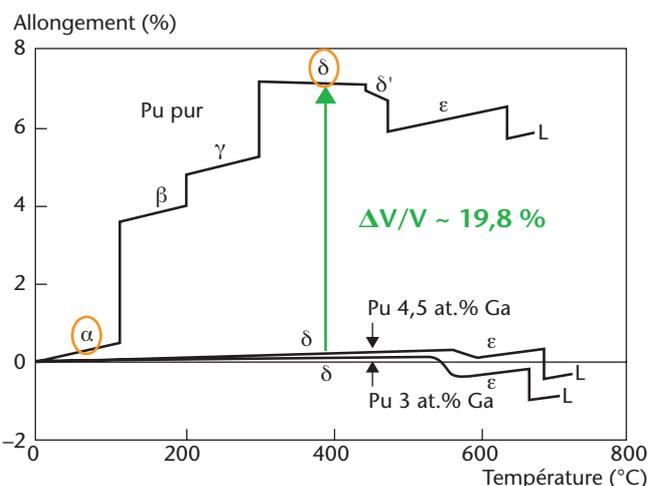


Figure 1

Dilatation thermique du plutonium pur, mettant en évidence six phases de la température ambiante à la fusion (640 °C) ainsi qu'une dilatation exceptionnellement élevée entre la phase α et la phase δ .

La phase δ dans les alliages *PuAm* : une stabilité contradictoire

À température et à pression ambiantes, les alliages de plutonium stabilisés en phase δ sont en réalité métastables, et peuvent, sous l'effet d'une diminution de température ou d'une augmentation de pression, être "déstabilisés". Cette déstabilisation se traduit par l'apparition partielle d'une nouvelle phase : la phase α' (dite phase martensitique). La température (respectivement la pression) à laquelle apparaît la phase α' est appelée T_{MS} (respectivement P_{MS}). Elle reflète directement le degré de stabilité de la phase δ : plus la T_{MS} est élevée (proche de la température ambiante) ou plus la P_{MS} est faible (proche de la pression atmosphérique), moins la phase δ est stable. À basse température, les alliages *PuGa*, *PuAl*, et *PuCe* stabilisés en phase δ présentent une transformation martensitique avec une T_{MS} d'autant plus basse que la teneur en soluté est élevée. Un comportement totalement différent est observé pour les alliages *PuAm* (figure 2) : même l'alliage le plus faiblement allié, contenant 5 atomes % d'américium, pourtant en limite de stabilité de la phase δ à température ambiante, reste monophasé δ à 4 K [1]. Par contre, le comportement en pression des alliages *PuAm* rejoint celui des autres alliages stabilisés en phase δ (*PuAl*, *PuGa*), à savoir une P_{MS} d'environ 0,4 à 0,8 GPa pour les teneurs en élément deltagène les plus faibles [2] [3] (figure 3).

Résistivité électrique

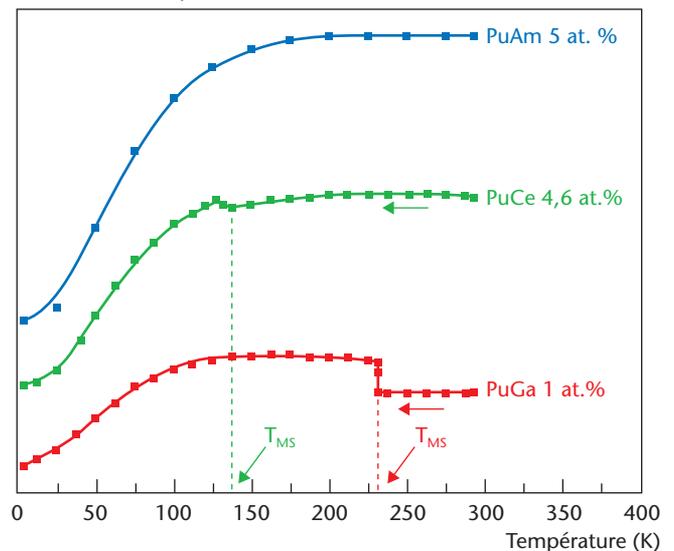


Figure 2

Résistivité électrique en fonction de la température pour différents alliages stabilisés en phase δ . Pour chaque alliage, nous considérons la teneur en soluté proche de la limite de stabilité à température ambiante. La déstabilisation de la phase δ se traduit par une augmentation de la résistivité électrique.

Cette étude a ainsi montré que l'américium est un élément deltagène "à part". En particulier, le comportement des alliages *PuAm* remet en cause l'analogie faite classiquement entre les basses températures et les hautes pressions, quand nous considérons la déstabilisation de la phase δ . Pour aller plus loin dans la compréhension des mécanismes de stabilisation de cette phase dans les alliages de *Pu*, il est nécessaire de caractériser très finement sa structure cristalline à grande et à courte distance en fonction de la température et de la pression. Il s'agit d'un programme d'études qui a commencé en laboratoire, et qui sera complété à l'aide des moyens expérimentaux prochainement disponibles auprès du synchrotron SOLEIL.

Ces nouveaux moyens de caractérisation structurale sur le synchrotron SOLEIL sont attendus pour aller encore plus loin dans la compréhension des mécanismes de stabilisation de la phase δ des alliages de *Pu*.

Références

- [1] N. BACLET, M. DORMEVAL, L. HAVELA, J. M. FOURNIER, C. VALOT, F. WASTIN, T. GOUDER, E. COLINEAU, C. T. WALKER, S. BREMIER, C. APOSTOLIDIS, G. H. LANDER, "Character of the 5f states in the Pu-Am system from magnetic susceptibility, electrical resistivity, and photoelectron spectroscopy measurements", *Phys. Rev. B*, **75**, p. 035101 (2007).
- [2] P. FAURE, V. KLOSEK, C. GENESTIER, N. BACLET, S. HEATHMAN, P. NORMILE, R. HAIRE, "Structural investigation of delta-stabilized plutonium alloys under pressure", *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **893**, Warrendale, PA (2005).
- [3] V. KLOSEK, P. FAURE, C. GENESTIER, N. BACLET, "Recent Advances in Actinide Science", Édité par R. ALVARES, N. BRYAN, I. MAY, The University of Manchester, Royal Society of Chemistry (2006).

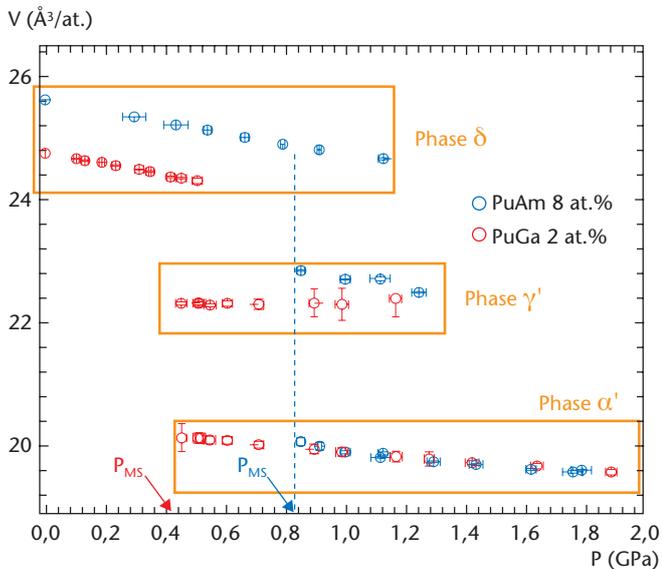


Figure 3

Évolution des volumes atomiques relatifs aux différentes structures cristallines observées en fonction de la pression pour deux alliages stabilisés en phase δ . Ces données ont été obtenues par diffraction des rayons X sur des échantillons maintenus sous pression statique dans une cellule à enclume de diamant. Sous l'effet de la pression, la phase δ transite vers la phase α' . La phase γ' est observée en coexistence avec la phase α' au cours de la transformation de phase.

LE CÉRIUM, UN CRISTAL SENSIBLE À L'ENTROPIE

B. AMADON
CEA - DAM - Île-de-France

Chaque élément peut se présenter sous de multiples phases : solide, liquide ou gazeuse. Étonnamment, le cérium présente deux phases solides de même géométrie, mais pourtant différentes. En chauffant le cristal, il se dilate brutalement. Son volume augmente de 15 %. À basse température, les électrons sont délocalisés sur tout le cristal et sautent facilement d'un atome à l'autre (phase α). Lorsque la température augmente, le cristal se dilate. La distance entre atomes étant plus grande, les électrons préfèrent se localiser autour de leur noyau de cérium (phase γ) car, du fait de leur charge négative, ils sont repoussés par les autres cortèges électroniques.

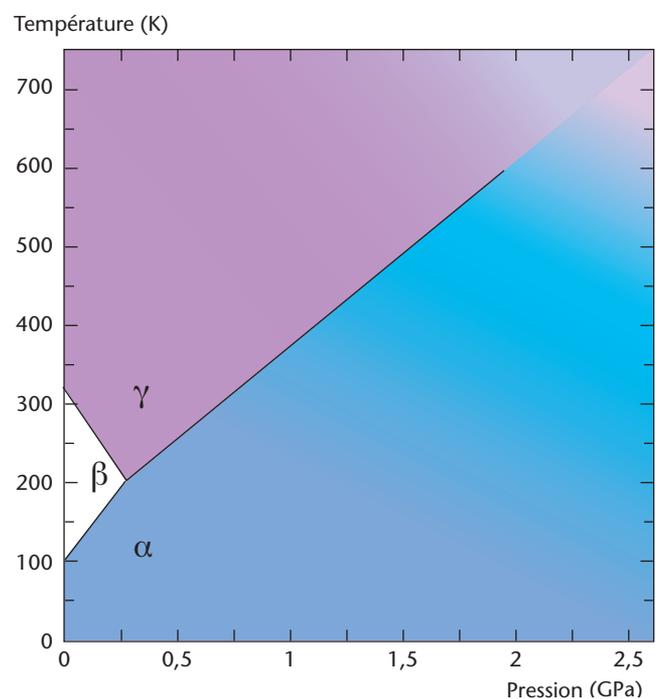
Nous avons montré [1], grâce à l'analyse des expériences et à des calculs quantiques, que ce comportement est gouverné par l'entropie du système. Nous pouvons donc proposer une explication plausible. À haute température, le cristal commence à se dilater à cause de l'agitation thermique. Les centres, en s'éloignant, entraînent l'apparition de nouveaux états localisés possibles pour les électrons. La population de ces états augmente l'entropie du système, ce qui favorise ces configurations, et augmente la dilatation du cristal.

Ces études permettent d'affiner la description complexe des interactions entre électrons. En outre, la transition isostructurale du cérium, de par sa simplicité, constitue un modèle pour de nombreux autres terres rares et actinides.



Nous pouvons distinguer trois domaines de stabilité : phases β , γ et α , dans le diagramme de phase du cérium (figure 1). En ordonnée, se trouve la température en Kelvin. En abscisse, figure la pression en gigapascal (1 GPa vaut un milliard de fois la pression atmosphérique). Au dessous de la température critique de 600 K, la différence de volume entre les phases γ et α croît pour atteindre 15 % à température ambiante. Les géométries des phases α et γ étant les mêmes (figure 2), il s'agit d'une transition isostructurale du premier ordre. Les deux phases ne diffèrent donc que par leurs propriétés électroniques. Différentes explications ont été proposées depuis les travaux de Pauling dans les années 50. Ce n'est que récemment que des méthodes théoriques sont apparues pour étayer les raisonnements qualitatifs.

Figure 1
Diagramme de phase du cérium solide



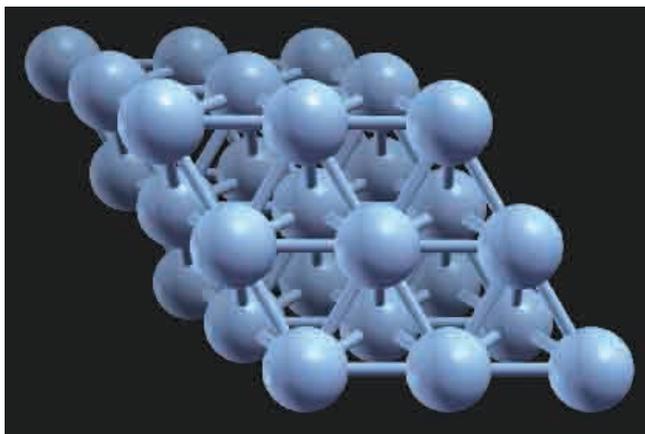


Figure 2
Structure des phases α et γ .

**Au niveau microscopique,
les interactions entre électrons
sont à l'origine de la transition**

L'interprétation actuelle repose sur l'importance des interactions entre électrons. Dans la classification périodique des éléments, la charge du noyau augmente en même temps que le nombre d'électrons. Or, d'après la mécanique quantique, les électrons s'empilent dans des couches atomiques. À chacune d'elles, correspond une probabilité différente de trouver l'électron en un point donné. En arrivant au cérium, un électron se loge dans une couche (*aussi appelée orbitale*) d'une symétrie nouvelle (*appelée 4f*). Il se trouve que cette orbitale est essentiellement localisée très près du noyau. Il serait coûteux en énergie d'ajouter un deuxième électron dans l'orbitale 4f, car la répulsion entre électrons serait très forte dans une couche si localisée. Or, ce sont les électrons, qui, en se délocalisant, assurent la cohésion d'un solide, si bien que l'électron 4f dans le cérium ne pourra participer à la liaison chimique que dans des conditions particulières, comme l'a montré *Johansson* en 1974 [2]. Par ailleurs, la phase γ est paramagnétique. Cela montre qu'il existe des moments magnétiques locaux, donc que les électrons restent dans leur couche atomique sans se délocaliser. Par contre, dans la phase α , il n'existe pas de moments locaux. Dans ce cas, les électrons sont donc partiellement délocalisés et participent à la liaison chimique, d'où le plus petit volume de cette phase. Des expériences dites de photoémission, qui consistent à mesurer l'énergie nécessaire pour ajouter ou enlever un électron au système, permettent de le mettre en évidence. Un spectre de photoémission représente, en fonction de l'énergie, l'efficacité de ce processus. Les spectres expérimentaux sont représentés sur la figure 3. Nous voyons que, dans les deux phases, il est nécessaire d'utiliser une grande énergie (*plusieurs eV*) pour modifier d'une unité le nombre d'électrons autour d'un atome. Cela montre que, même dans la phase α , les électrons sont partiellement localisés. Par contre,

il existe un pic correspondant à une énergie nulle, uniquement dans la phase α . Cela provient du fait que les électrons commencent à se délocaliser dans cette phase. Notons que pour décrire la plus forte cohésion de la phase α , *Pauling* et *Zachariasen* devaient supposer que l'électron 4f localisé était promu dans des orbitales délocalisées, ce qui a été contredit par les expériences plus récentes.

L'objectif de notre travail est de décrire la transition à partir de la mécanique quantique. Cette théorie est précise dans la description des systèmes de petites tailles (*atomes*). Pour étudier un solide, il est nécessaire de recourir à des approximations. Or, les plus usuelles ne permettent que de décrire, soit des électrons complètement délocalisés, soit une situation quasi

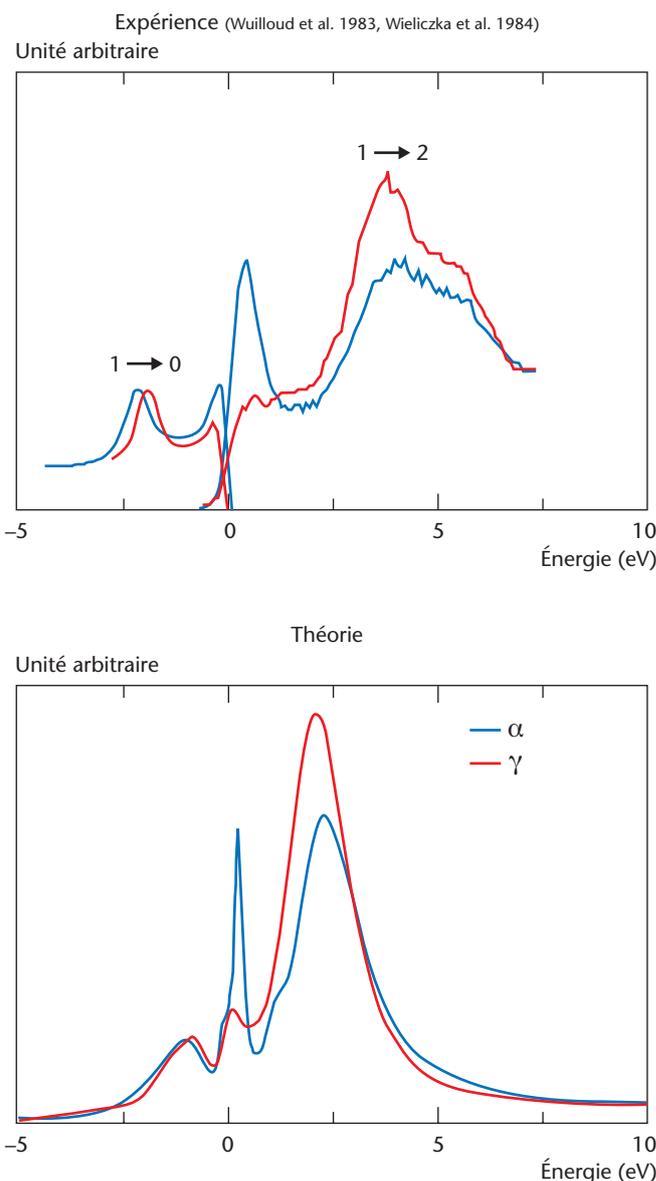


Figure 3
Spectres de photoémissions inverse et directe, expérimentaux (*en haut*) et théoriques (*en bas*). La variation du nombre d'électrons est indiquée pour les pics à haute énergie.

atomique. Une méthode développée depuis une dizaine d'années [3] permet de décrire les deux limites dans un même formalisme, en prenant en compte correctement le cas où les électrons sont partiellement localisés, comme dans le cas du cérium α . Dans cette méthode de calcul – appelée “Théorie du champ moyen dynamique” (DMFT) – le problème des orbitales localisées (comme les orbitales $4f$) est traité exactement – au prix d'un effort de calcul important – les approximations étant reportées dans d'autres parties du problème. En collaboration avec des chercheurs de l'École polytechnique et du RICS (Japon), nous avons mis en œuvre cette méthode dans un formalisme général. Nous l'avons, en particulier, appliquée à la description des spectres de photoémission [1]. Nous retrouvons les résultats publiés précédemment [4] et nous décrivons les principales caractéristiques de ces spectres (figure 3), notamment l'apparition d'un pic à énergie nulle dans la phase α .

L'entropie est indispensable pour décrire la transition

D'autres informations peuvent être extraites du diagramme de phase. Remarquons, tout d'abord, l'analogie formelle avec le diagramme de la transition liquide-gaz. Dans les deux cas, nous observons un point critique, et le signe de la pente de la ligne de transition de phase est positif. La thermodynamique nous enseigne que cela est dû à l'entropie plus importante de la phase γ par rapport à la phase α . En effet, s'il faut une pression plus importante pour provoquer la transition α - γ lorsque la température augmente, cela signifie que la phase de plus grand volume (γ) est de plus en plus stabilisée lorsque la température augmente (et il se trouve que l'entropie thermodynamique prend une plus grande importance à haute température). Le calcul numérique montre que son importance est si grande qu'elle inverse l'ordre énergétique des phases. Nous avons appliqué la méthode DMFT au calcul de l'énergie. Nous évaluons la stabilité des deux phases. Non seulement nous retrouvons le rôle prépondérant de l'entropie, mais nous montrons que l'entropie est nécessaire pour que la transition se produise [1].

L'entropie provient du nombre d'états accessibles au système, donc, en quelque sorte, au nombre de degrés de liberté. Il est clair que les particules d'un gaz ont une entropie de mouvement bien plus grande que celle du liquide. Dans le cas du cérium, nous pouvons proposer l'explication plausible suivante : l'aimantation des électrons $4f$ localisés peut prendre plusieurs valeurs dans la phase γ , d'où une valeur importante pour l'entropie, alors que dans la phase α , le moment local a disparu ainsi que l'entropie associée.

Cette étude du cérium souligne donc le rôle de l'entropie dans les transitions dues à la localisation des électrons. Cela ouvre aussi la voie à l'exploration de transitions faisant intervenir des géométries plus complexes et, à terme, à des calculs prédictifs lorsque les expériences sont difficiles à réaliser.

Références

- [1] B. AMADON, S. BIERMANN, A. GEORGES, F. ARYASETIAWAN, “The α - γ transition of Cerium is entropy-driven”, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, p. 066402 (2006).
- [2] B. JOHANSSON, “ α - γ transition in Cerium is a Mott transition”, *Philos. Mag.*, **30**, p. 469 (1974).
- [3] A. GEORGES, G. KOTLIAR, W. KRAUTH, M. J. ROZENBERG, “Dynamical mean-field theory of strongly correlated fermion systems and the limit of infinite dimensions”, *Rev. Mod. Phys.*, **68**, p. 13 (1996).
- [4] K. HELD, A. K. MCMAHAN, R. T. SCALETTAR, “Cerium volume collapse: results from the merger of dynamical mean-field theory and local density approximation”, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, p. 276404 (2001).

DES BULLES QUI FONT VIEILLIR

A. FABRE, J. DEMOMENT, S. CONTRERAS, S. THIÉBAUT
CEA - Valduc

Le tritium réagit avec de nombreux métaux pour former des trituries. Ceux-ci peuvent être ioniques, covalents ou métalliques, selon la nature de la liaison. Le stockage du tritium sous forme de trituriure métallique permet de récupérer le tritium gazeux avec un minimum de pollution par d'autres gaz, en particulier par l'hélium issu de la décroissance radioactive du tritium qui reste piégé dans le réseau métallique.

La présence de ces atomes d'hélium 3 dans le métal, qui ont tendance à se regrouper sous forme de bulles, entraîne le vieillissement de ces matériaux. La connaissance des modules élastiques du trituriure de palladium et des caractéristiques des bulles d'hélium 3 permettent la modélisation de ce vieillissement. Leurs études sont donc cruciales pour améliorer notre compréhension du phénomène.

Nous avons développé une technique in situ novatrice, basée sur la détection des fréquences de résonance d'un microlevier, pour mesurer les modules élastiques de matériaux. Cela nous a permis de les déterminer pour l'hydrure, le deutériure, et le trituriure de palladium. Ces mesures ont mis en évidence des différences d'élasticité suivant l'isotope d'hydrogène présent dans le matériau. Le module élastique du trituriure a également été suivi en fonction du temps. L'ensemble des mesures sur le trituriure de palladium sont des premières mondiales. Par ailleurs, la taille et la répartition des bulles d'hélium ont été observées, jusqu'à 8 mois de vieillissement, par microscopie électronique en transmission. Les différentes observations ont mis en évidence l'importance cruciale du premier mois de vieillissement.

Il reste maintenant à mettre en commun ces propriétés mécaniques et microstructurales pour progresser dans la compréhension des mécanismes de réarrangement de l'hélium de décroissance dans le trituriure de palladium.



Les trituriures sont ainsi nommés par analogie avec les hydrures dont ils présentent notamment tous les avantages vis-à-vis du stockage du tritium, que ce soit en termes de réversibilité, de compacité ou de sécurité.

Le piégeage de l'hélium 3 est à l'origine du vieillissement des trituriures

Le piégeage de l'hélium 3 issu de la décroissance radioactive du tritium est une propriété exclusive des trituriures. Cette caractéristique est à l'origine du vieillissement de ce matériau. En effet, les atomes d'hélium 3, initialement générés en position interstitielle, ont tendance à se réorganiser dans la matrice sous forme de bulles dont la nucléation et la croissance au cours du temps altèrent l'ensemble des propriétés initiales des trituriures. Nous cherchons à appréhender ce phénomène de vieillissement au moyen de modèles prédictifs afin de maîtriser nos

dispositifs de stockage et d'en concevoir de nouveaux. La période radioactive du tritium (12,32 ans) impose un délai important dans l'aboutissement d'une étude expérimentale exhaustive.

Le modèle, développé dans le cadre d'une collaboration entre le CEA - Valduc et l'École des Mines de Saint-Etienne, s'appuie sur des paramètres d'entrée et de recalage directement issus d'expériences clés dont voici deux exemples.

Élasticité du trituriure de palladium

À l'échelle macroscopique, les propriétés élastiques des trituriures métalliques représentent des données fondamentales pour la partie mécanique du modèle de vieillissement. Le peu d'études expérimentales disponibles dans la littérature à propos des trituriures se justifie par la difficulté à manipuler du tritium, et par les limites intrinsèques des méthodes standards

lorsqu'elles sont appliquées au cas des trituries. En effet, la manipulation des trituries métalliques impose de savoir gérer un système biphasé solide-gaz. L'idéal consiste à accéder aux constantes élastiques de ces matériaux *in situ*, c'est-à-dire sous une atmosphère tritiée, si possible minimisée. La solution trouvée a été la suivante : soumettre l'une des extrémités d'un microlevier fabriqué à partir du métal étudié à une excitation mécanique. Des ondes acoustiques se propagent alors le long du matériau, et, pour certaines fréquences particulières et caractéristiques de l'échantillon, les oscillations deviennent résonantes. Ces fréquences de résonance dépendent de la géométrie et des dimensions du levier, de la densité du matériau, et de ses modules élastiques. La détection et la mesure de la fréquence des modes résonants se propageant dans le levier permettent de déterminer le module d'Young du matériau, à condition que les autres caractéristiques citées précédemment soient connues. La partie la plus originale du système a été la mise au point d'une cellule de mesure de faible volume, étanche, constituée de matériaux durablement compatibles avec le tritium, dans laquelle un microlevier peut vibrer. Une mesure par diode laser et détection synchrone des vibrations de l'échantillon a achevé la conception du dispositif. Celui-ci apporte une solution à de nombreux problèmes de mesures de propriétés élastiques de matériaux sous atmosphère réactive ou en milieu liquide (figure 1). Ce prototype a été validé en termes de sensibilité thermique, d'effets de régimes de gaz, de géométrie de microleviers, de préparation et de texture d'échantillons polycristallins, de matériaux tests, etc.

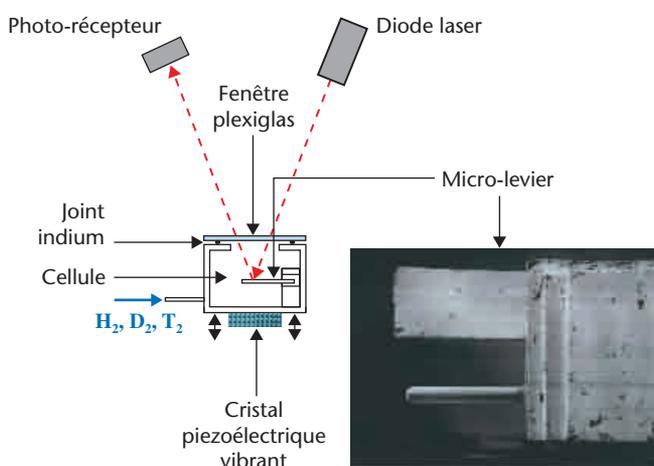


Figure 1
Schéma de principe du dispositif expérimental développé.

Les conséquences de l'hydruration, ainsi qu'un effet isotopique sur le module d'Young de l'hydrure et du deutéride de palladium ont été confirmés avant d'être étendus, pour la première fois, au cas du tritium. Les valeurs mesurées sont respectivement de 112, 117 et 119 GPa. De plus, les effets du vieillissement sur ce dernier ont été suivis en continu jusqu'à deux ans après le chargement initial en tritium (figure 2). Ce suivi fait clairement apparaître l'importance du premier mois, puisque la majeure partie de l'évolution a lieu au cours de cette période.

Caractérisation des bulles d'hélium

Au niveau de l'échelle microscopique, la taille et la répartition des bulles d'hélium sont des observables fondamentales pour le modèle. Ces caractéristiques ont été mesurées jusqu'à 8 mois de vieillissement, par microscopie électronique en transmission (figure 3). Elles ont confirmé, comme cela avait été vu sur l'évolution du module d'Young, l'importance cruciale du premier mois de vieillissement. L'homogénéité et la densité de la distribution des bulles semblent acquises dès ce premier mois. Les atomes d'hélium nouvellement créés au cours du temps participent ensuite, vraisemblablement, à la légère augmentation du diamètre nanométrique des inclusions et de leur pression interne, cette dernière restant un paramètre clé. C'est d'ailleurs là un axe majeur de travail : ces études d'observation sont actuellement complétées par une investigation de la densité atomique de l'hélium dans les bulles, par spectroscopie de pertes d'énergie d'électrons, qui doit permettre d'évaluer la pression intra-bulle.

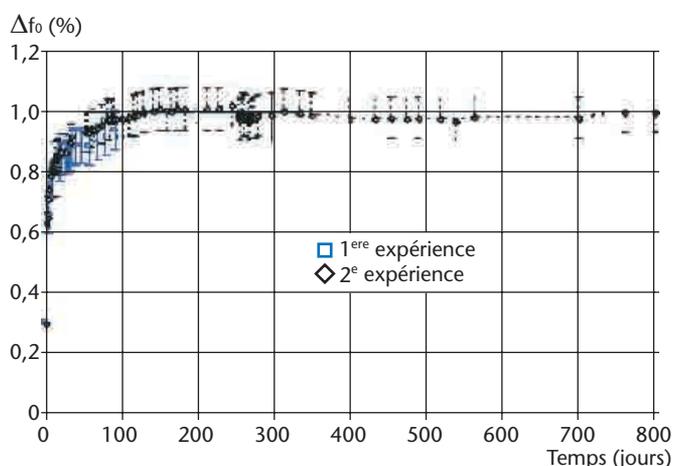


Figure 2
Évolution du module d'Young d'un échantillon de trituration de palladium (*en phase β*) en fonction du temps de vieillissement sous tritium.

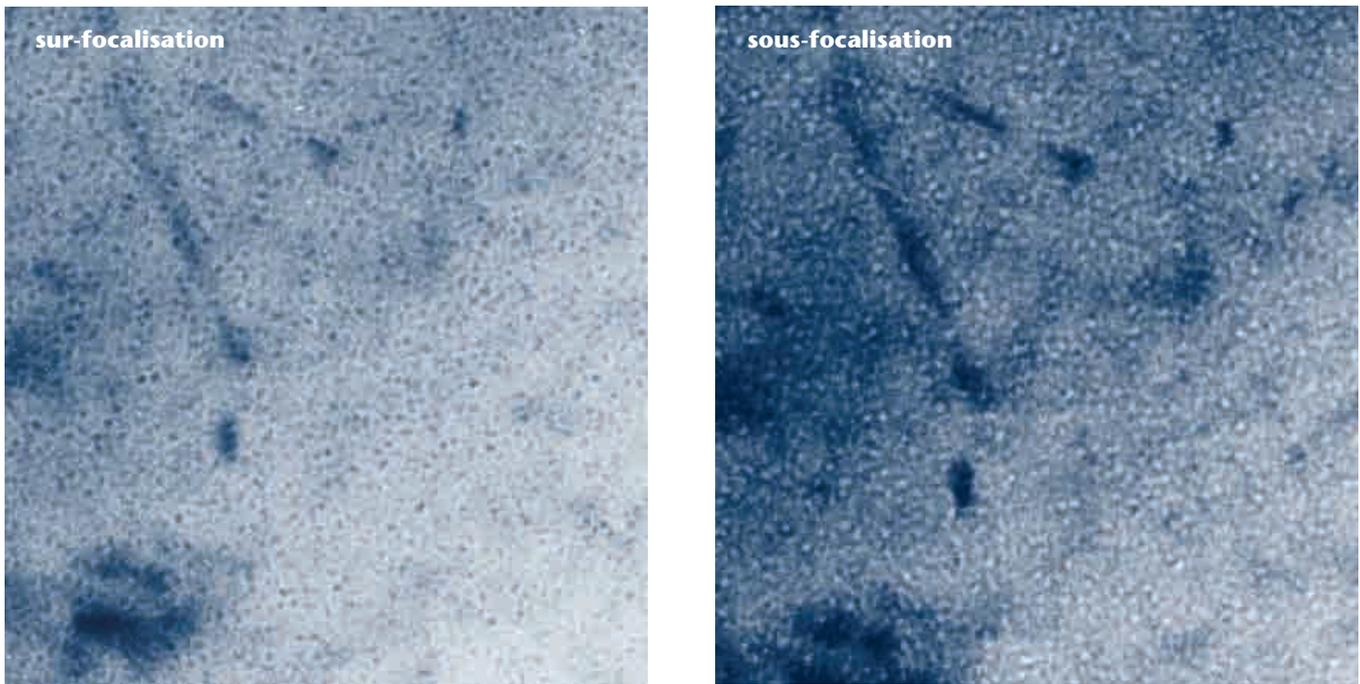


Figure 3

Image MET révélant une distribution homogène de bulles d'hélium nanométriques dans une matrice de palladium, après vieillissement d'un mois sous tritium. Les bulles apparaissent comme des points noirs sur fond clair sur le cliché de sur-focalisation, et comme des points blancs sur fond sombre sur le cliché de sous-focalisation, conformément aux contrastes de cavités attendus.

Il nous faut dorénavant caractériser les bulles d'hélium au-delà de 8 mois de vieillissement

Il nous faut poursuivre ces travaux, tant en termes de caractérisations mécaniques qu'en termes de caractérisation expérimentale des bulles, en étudiant le phénomène pour des temps de vieillissement plus longs.

Références

- [1] A. FABRE, B. DÉCAMPS, E. FINOT, J.-M. PÉNISSON, J. DEMOMENT, S. THIÉBAUT, S. CONTRERAS, A. PERCHERON-GUÉGAN, "On the correlation between mechanical and TEM studies of the aging of palladium during tritium storage", *J. of Nucl. Mat.*, **342**, p. 101-107 (2005).
- [2] F. MONTHEILLET, D. DELAPLANCHE, A. FABRE, E. MUNIER, S. THIÉBAUT, "A mechanical analysis of metallic tritide aging by helium bubble growth", *en attente de soumission à Acta Materialia*.
- [3] A. FABRE, E. FINOT, J. DEMOMENT, S. CONTRERAS, J.-P. GOUDONNET, "A new method for in situ measuring mechanical properties of materials under reactive atmosphere", *Rev. Sci. Instrum.*, **72**, issue 10 (2001).

UN CAPTEUR CHIMIQUE DE GAZ

P. MONTMÉAT, F. PARRET, L. HAIRAUT, P. PRENÉ
CEA - Le Ripault

Que ce soit au titre du contrôle de la pollution, ou de la lutte contre le terrorisme, la détection de substances chimiques gazeuses devient un élément incontournable de la vie quotidienne. C'est une des raisons pour lesquelles divers groupes de recherche s'attachent à mettre au point des capteurs chimiques de gaz. Ces dispositifs sont aisément miniaturisables et bénéficient de coûts de fabrication réduits. Leur fonctionnement est basé sur une interaction entre un matériau sensible solide et une phase gazeuse, qui conduit à une modification de la physico-chimie du matériau. Récemment, des chercheurs du CEA - DAM, en collaboration avec l'Université de Dijon, ont développé des capteurs de vapeurs d'explosifs de type nitroaromatique. Cet article décrit la conception et les performances de détection des capteurs.

L'utilité de disposer de systèmes fiables et sensibles permettant de surveiller la concentration dans l'air de composés toxiques n'est plus à démontrer. De tels dispositifs basés sur des capteurs chimiques de gaz sont couramment utilisés dans l'industrie chimique et dans certains laboratoires. Ils permettent de contrôler les taux d'exposition de divers dérivés toxiques comme le monoxyde de carbone ou le benzène.

Par ailleurs, l'utilisation croissante d'explosifs par des terroristes nécessite la mise au point de systèmes de détection de vapeurs spécifiques. Il s'agit ici de détecter rapidement, et de façon fiable, la présence de substances pyrotechniques aussi bien dans les bagages ou les véhicules que dans le sol. À l'heure actuelle, c'est le nez du canidé qui constitue l'outil le plus performant. Toutefois, l'utilisation du chien est limitée dans le temps et nécessite un entraînement spécifique, régulier, et coûteux.

C'est pour l'ensemble de ces raisons que divers groupes de recherche axent leurs efforts sur l'élaboration de capteurs chimiques de vapeurs d'explosifs. Plus particulièrement, en collaboration avec l'université de Dijon, des chercheurs du CEA - DAM [1], ont développé des capteurs de vapeurs d'explosifs de type nitroaromatique (figure 1). Il s'agit de microbalances à quartz revêtues de macrocycles métallés.

Des détecteurs de nitroaromatiques ont été développés dans le cadre d'une collaboration entre l'université de Dijon et le CEA-Le Ripault

Principe de fonctionnement d'un capteur chimique de gaz

Le principe de fonctionnement d'un capteur chimique de gaz repose sur l'interaction hétérogène entre un matériau sensible solide et le gaz que l'on souhaite détecter. Comme cela est présenté dans le cadre de la figure 2, c'est à l'issue de cette interaction que nous assistons à la modification d'une ou plusieurs des propriétés physico-chimiques du matériau, à savoir : modification de la masse, de la conductivité électrique, ou de la température.

Généralement, le capteur se compose de quatre unités bien distinctes. Le substrat assure la tenue mécanique du dispositif. Le matériau sensible est le siège des réactions chimiques avec le gaz. Il peut être de diverses natures (*organique, oxyde métallique, etc.*), et il doit disposer d'une excellente affinité pour le gaz à détecter. Il est déposé en film mince sur le substrat (*épaisseur de 10 nm à 1 µm*). Le transducteur, déposé sur le substrat,

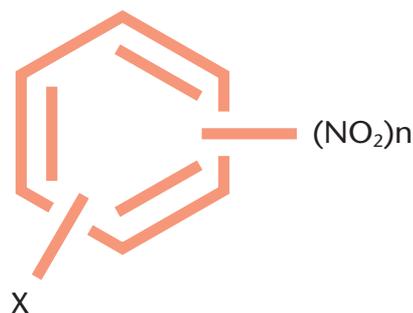


Figure 1
Composé nitroaromatique

a pour rôle de convertir l'information physico-chimique en une information électrique plus facilement exploitable. Le dispositif de mesure assure l'acquisition du signal électrique issu du transducteur, et précède souvent une étape de traitement du signal adapté.

Dispositif étudié

Le dispositif utilisé ici est un capteur gravimétrique : c'est une variation de masse du matériau sensible qui est prise en compte. Le transducteur choisi est une microbalance à quartz : nous mettons à profit les propriétés de piézoélectricité du quartz. En particulier, sa fréquence de vibration est directement liée à la masse du matériau déposé à sa surface.

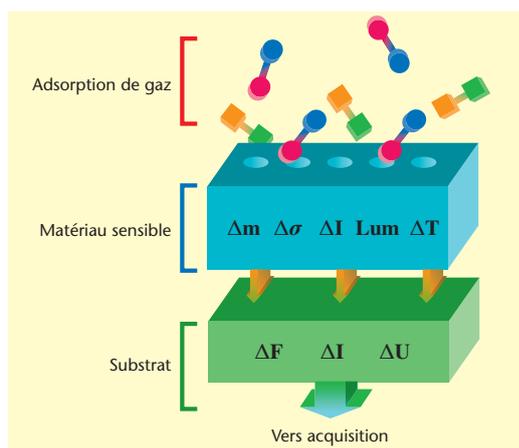


Figure 2
Principe de fonctionnement des capteurs chimiques de gaz.

Le choix du matériau sensible a porté sur une famille de composés bien connus pour leur aptitude à la détection des gaz : les métalloporphyrines (figure 3). Ces macromolécules sont caractérisées par leurs substituants périphériques R_1 ou R_2 , et par le métal central M . Ce sont ces deux composantes qui confèrent au capteur sa sensibilité et sa spécificité [2]. La synthèse des molécules est réalisée au Laboratoire d'Ingénierie Moléculaire pour la Séparation et les Applications des Gaz de l'Université de Dijon [3].

La métalloporphyrine est déposée sur la microbalance au moyen d'une technique de pulvérisation en solution.

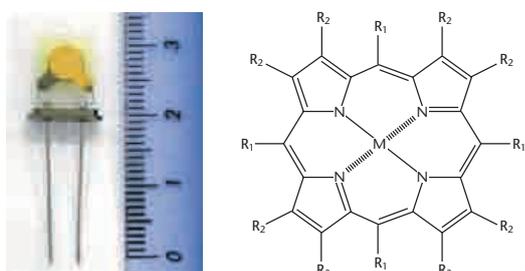


Figure 3
Microbalance à quartz et métalloporphyrine.

Ensuite, il s'agit d'évaluer les performances de détection du quartz revêtu. Deux critères sont retenus : la sensibilité et la sélectivité. La sensibilité représente la réponse du capteur à une pression donnée de vapeur de nitroaromatique. La sélectivité caractérise l'aptitude du capteur à discriminer le nitroaromatique en présence d'autres vapeurs interférentes comme des solvants usuels.

La réponse d'un capteur à 3 ppmv (partie par million volumique) de nitroaromatique est présentée sur la figure 4. Le polluant provoque une nette diminution de la fréquence du quartz : nous assistons à une fixation des vapeurs de nitroaromatique à la surface de la métalloporphyrine. Comme prévu, le macrocycle se révèle particulièrement sensible au dérivé d'explosifs ciblé.

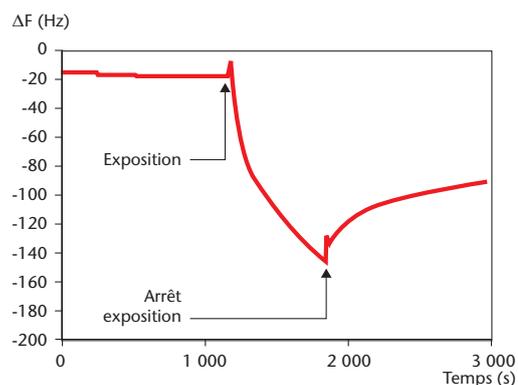


Figure 4
Réponse d'un capteur aux vapeurs de nitroaromatique.

Des tests de sélectivité ont été menés. Ils consistent à évaluer la réponse des capteurs à différentes vapeurs interférentes comme les solvants usuels. De ces essais, il ressort que la réponse du quartz en présence de nitroaromatique est au moins 100 fois supérieure à celle observée en présence de solvants.

Nous serons capables de développer un détecteur d'explosifs

Nous avons démontré la faisabilité d'un capteur de vapeur d'explosifs au moyen d'une microbalance à quartz revêtu de métalloporphyrine.

Références

- [1] P. MONTMÉAT et al, "Metalloporphyrins as Sensing Material for Quartz-Crystal Microbalance Nitroaromatics Sensors", *IEEE Sensors Journal*, 5, n°4, p. 610-615 (Août 2005).
- [2] A. D'AMICO et al, "Metalloporphyrins as basic material for volatile sensitive sensors", *Sensors and Actuators B*, 65, p. 209-215 (2000).
- [3] F. BOLZE et al, "Luminescence properties of a cofacial dipalladium porphyrin dimer under argon and in the presence of dioxygen", *J. Porphyr. Phtalocyanin.*, 253, p. 569-574 (2001).

UN LASER À L'ASSAUT DE LA STRATOSPHERE

S. CHAMPEAUX, L. BERGÉ, S. SKUPINE
CEA - DAM - Île-de-France

Les impulsions optiques femtosecondes ont la propriété de se propager sur de grandes distances dans l'atmosphère. Leur puissance élevée, se situant au-dessus du seuil critique d'auto-focalisation, induit une dynamique de compression spatiale sur le faisceau, qui est arrêtée par la génération d'un plasma de faible densité électronique. La structure optique résultant de cette dynamique est un filament de taille sub-millimétrique et d'intensité élevée. Parce qu'ils développent un spectre large, ces "filaments femtosecondes" sont utilisés pour identifier des polluants atmosphériques à distance. Pour des faisceaux larges ayant des puissances lasers élevées, de nombreux filaments peuvent se former au cours de la propagation de l'impulsion laser. Garantir une propagation de qualité requiert alors de contrôler cette filamentation multiple, de façon à assurer une cohésion maximale du faisceau sur des kilomètres. Durant l'année 2006, les physiciens du CEA - DAM ont obtenu deux résultats importants à ce sujet. Le premier concerne la propagation verticale d'impulsions femtosecondes dans l'air, induisant des variations de pression qui amoindrissent la filamentation multiple. Le deuxième démontre la propagation auto-guidée de faisceaux ultra-puissants (> 30 TW) jusque dans la stratosphère.



Les techniques d'amplification optique à dérive de fréquence permettent de délivrer des impulsions lasers de quelques dizaines de femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ sec}$) à des niveaux d'énergie approchant le joule. La puissance contenue dans ces impulsions est généralement supérieure au seuil d'auto-focalisation au-delà duquel un faisceau laser subit une compression spatiale induite par la réponse du milieu, appelée effet *Kerr*. Cette compression s'accompagne d'une croissance notable de l'intensité laser, qui est limitée par l'ionisation des molécules ambiantes. La structure résultant de cette dynamique est un guide d'onde de petit diamètre ($\sim 100 \mu\text{m}$ pour des impulsions infrarouges) et d'intensité élevée ($\sim 50 \text{ TW/cm}^2$), couplé à un canal plasma de faible densité électronique ($< 10^{17} \text{ cm}^{-3}$). Ce "tube" de lumière, appelé "filament femtoseconde", est capable de parcourir de longues distances excédant la limite de diffraction naturelle du faisceau.

Le tube de lumière est capable de parcourir de grandes distances dans l'atmosphère

Pour une source laser opérant à 800 nm, un filament possède une puissance proche de 15 GW, soit environ 5 fois la puissance critique d'auto-focalisation dans l'air, P_{cr} . Pour des puissances supérieures au terawatt ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$), un faisceau contient plusieurs centaines de puissances critiques, et se casse en de nombreux filaments par instabilité modulationnelle. Nous parlons alors de "filamentation multiple". Un problème ouvert est de comprendre la dynamique de filamentation multiple lorsque le faisceau se propage dans un milieu de plus en plus raréfié, comme lors de sa traversée de l'atmosphère qui présente une décroissance régulière de pression.

Récemment, les chercheurs du CEA - DAM - Île-de-France ont permis d'élucider la propagation de filaments femtosecondes à différentes pressions [1]. Une collaboration entre ces mêmes chercheurs, ceux du CEA - Cesta, et les physiciens impliqués dans le projet Franco-Allemand TeraMobile a, par ailleurs, démontré que

des faisceaux lasers ultra-puissants (30 TW) étaient capables de se propager au-delà de 20 km, tout en continuant à émettre de la lumière blanche [2].

Filamentation multiple en atmosphère raréfiée

La filamentation d'impulsions ultracourtes dans l'air est décrite à partir de l'enveloppe lentement variable du champ laser, couplée à la densité d'électrons libres créés par ionisation. La réponse Kerr du milieu, les coefficients de dispersion, la densité d'espèces neutres, et le couplage plasma varient linéairement avec le paramètre de pression p . Dans le cas d'une propagation verticale, la densité de neutres et la pression décroissent exponentiellement avec l'altitude, caractérisée par une longueur d'atténuation d'environ 8 km. En diminuant la pression, la réponse Kerr du milieu s'amointrit, et la puissance critique d'auto-focalisation augmente.

Dans le cadre de la filamentation multiple, la distance d'apparition des filaments est dictée, selon la théorie de l'instabilité modulationnelle, par l'effet Kerr initial. En termes de puissance, cette distance évolue selon la loi d'échelle $z_{fil} \sim P_{cr} (p = 1 \text{ atm})/p.P_{in}$, où P_{in} désigne la puissance incidente de l'impulsion.

Les figures 1a et 1b montrent des coupes transverses d'une impulsion centimétrique de $800 P_{cr}$ sur un trajet horizontal, à une altitude de 3,3 km ($p = 0,7 \text{ atm}$). Le faisceau se casse en plusieurs filaments à $z_{fil} = 75 \text{ m}$ pour $p = 0,7 \text{ atm}$. La même figure de filamentation est produite à la distance $z_{fil} = 51 \text{ m}$ à pression atmosphérique (non montrée). La distance de filamentation est donc augmentée par un facteur $1/p$. Le nombre de filaments évoluant à plus grandes distances est aussi diminué dans un rapport de 30 %. Les figures 1c et 1d correspondent à un profil contenant $50 P_{cr}$, se propageant verticalement au-delà du kilomètre. De nouveau, nous observons une diminution en proportion du nombre de filaments, dont le diamètre s'accroît légèrement [1].

Une décroissance de la pression entraîne donc une augmentation notable de la distance d'apparition des filaments, et une réduction du nombre de filaments. Elle maintient l'enveloppe du faisceau confinée sur de plus grandes distances.

Un laser blanc ultra-puissant traverse la stratosphère

Alors que les faisceaux précédents ne contenaient que quelques centaines de puissances critiques,

une collaboration entre le CEA - DAM - Île-de-France, le CEA - Cesta, et les Universités de Lyon 1 et de Genève a permis de tester, pour la première fois, des impulsions ultracourtes transportant 32 TW de puissance optimale dans l'atmosphère. La source employée est celle de la ligne laser Alisé opérant à la longueur d'onde de 1 053 nm. Le faisceau peut contenir jusqu'à 5 000 puissances critiques. Il est émis verticalement dans l'atmosphère, en géométries parallèle ou focalisée. La lumière blanche rétro-diffusée est détectée à l'aide d'un télescope [2].

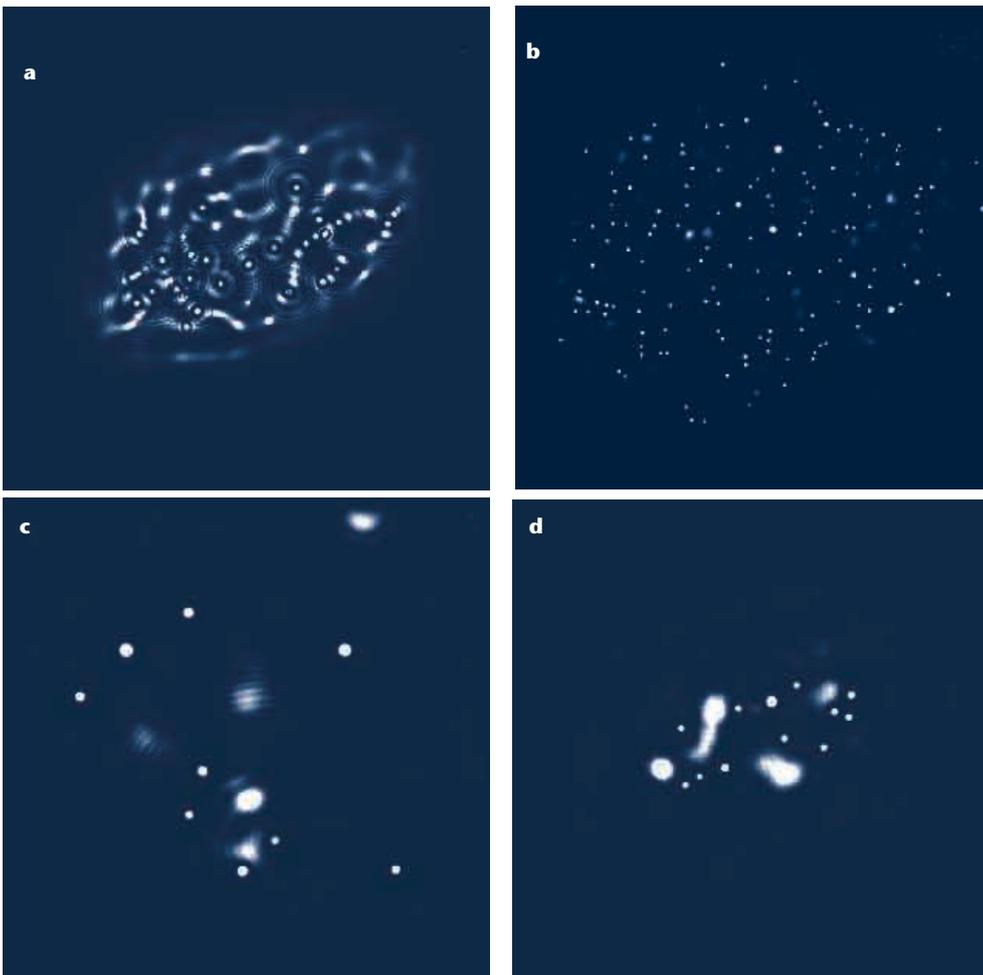


Figure 1
a et b montrent la filamentation multiple d'un faisceau TW ($P_{in} = 800 P_{cr}$) de 4 cm de rayon à la pression $p = 0,7 \text{ atm}$;
c et d montrent l'évolution de la tache filamenteuse d'un faisceau sub-TW ($P_{in} = 50 P_{cr}$) de 2,5 cm de rayon en propagation verticale.

Compte tenu de sa puissance élevée, le faisceau se casse en filaments multiples au bout de quelques mètres seulement. Cette fragmentation forme une structure en nid d'abeilles dans la tache focale du laser.

L'intensité de saturation des filaments est voisine de celle atteinte par des impulsions classiques (*sub-Joule*) à 800 nm, ce qui signale l'apparition d'un plasma d'électrons saturant l'auto-focalisation laser. La figure 2 montre quelques profils expérimentaux du faisceau Alisé pour diverses géométries de propagation. Le nombre de filaments peut dépasser 400, et les cellules filamenteuses deviennent indiscernables dans le cas d'une focalisation trop forte (figure 2b). Les figures 2d et 2e représentent les mêmes fluences dans le plan de diffraction transverse (x,y), simulées numériquement à partir d'un modèle de propagation 2D moyennant les variations temporelles de l'impulsion laser. Ce processus de filamentation multiple permet l'auto-guidage du faisceau sur de grandes distances. Les effets non-linéaires (*réponse Kerr, génération de plasma*) participent à l'élargissement du spectre initial. Celui-ci développe de la lumière blanche visible à plus de 20 km du sol, c'est-à-dire dans

la stratosphère. Il constitue le signal *Lidar* (*Light Detection and Ranging*) le plus puissant, le plus directif, et le plus lointain jamais émis. Ces résultats devraient améliorer dans le futur les performances des systèmes *Lidar* à impulsions ultra-courtes.

Ces résultats devraient améliorer les performances des systèmes Lidar à impulsions ultracourtes

Références

[1] S. CHAMPEAUX, L. BERGÉ, "Long-range multi-filamentation of femtosecond laser pulses versus air pressure", *Optics Letters*, **31**, p. 1301 (2006).
 [2] P. BÉJOT et al., "32 Terawatt light laser reaches the stratosphere", accepté à *Applied Physics Letters* (2007).

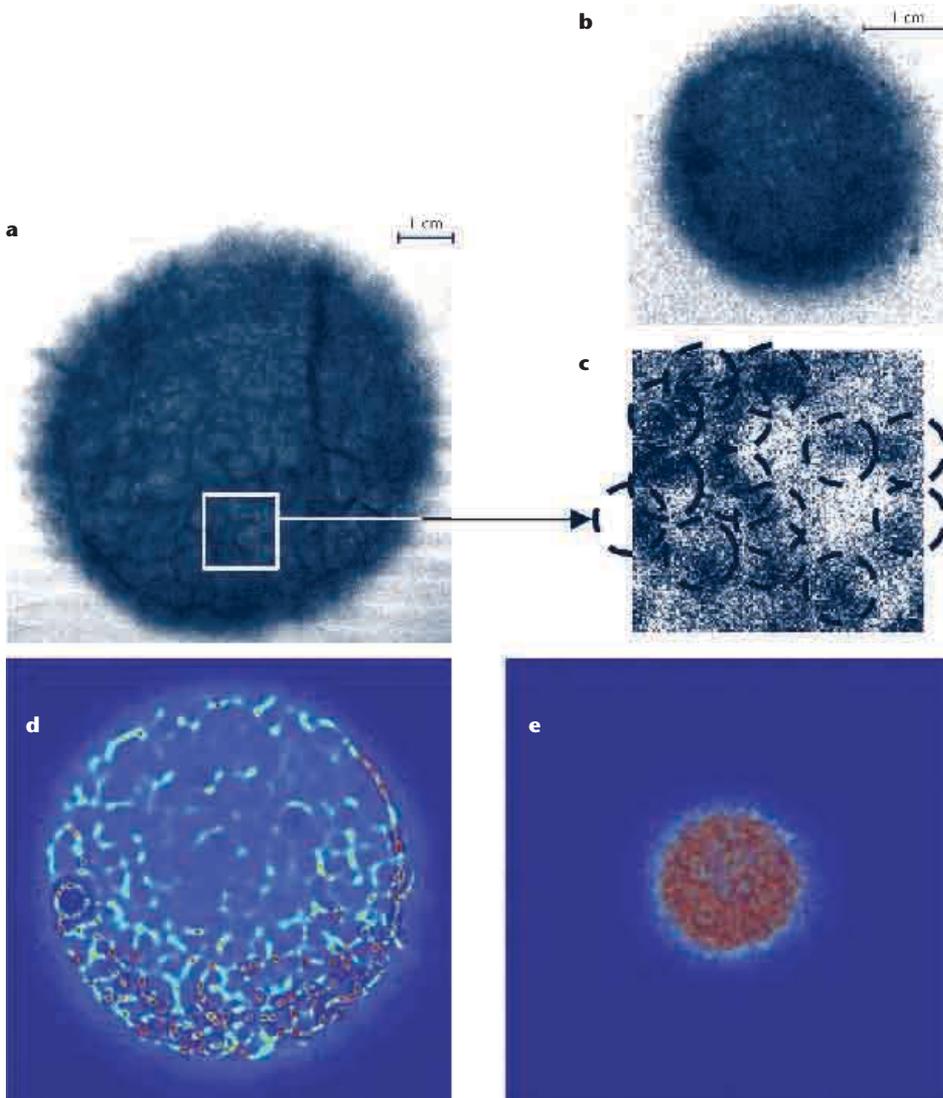


Figure 2
 Profils radiaux du faisceau de la ligne laser Alisé après 11 m de propagation.
a focale à 300 m ($2\,200 P_{cr}$, 290 filaments) ;
b focale à 16 m ($3\,180 P_{cr}$, aucun filament distinct) ;
c élargissement d'une zone filamenteuse ;
d, e figures de filamentation reproduites numériquement pour les mêmes paramètres lasers.

MODÉLISATION DES INSTABILITÉS DANS LES PLASMAS DU FUTUR LMJ

P. LOISEAU, O. MORICE, D. TEYCHENNÉ, M. CASANOVA, S. HÜLLER*, D. PESME*
CEA - DAM - Île-de-France, *CNRS - CPT École polytechnique

La modélisation réaliste des instabilités paramétriques affectant la propagation des faisceaux lasers dans une cavité conçue pour le Laser Mégajoule (LMJ), en configuration d'attaque indirecte, constitue un défi majeur pour l'atteinte de l'ignition. La difficulté principale de cette modélisation réside dans le fait que le comportement de ces instabilités est sensible à de nombreux paramètres, en particulier à l'évolution hydrodynamique du plasma. La propagation du faisceau laser, en prenant en compte l'hydrodynamique complète du plasma et les instabilités, est réalisée via la plateforme HERA. Les premières études dans le cas d'un plasma inhomogène multidimensionnel ont mis en évidence une perte de cohérence des ondes transmises et rétrodiffusées, qui se traduit par un élargissement de l'ouverture de chacune de ces ondes.



Un des risques potentiels majeurs d'échec de l'attaque indirecte est la perte de contrôle de la propagation des faisceaux lasers pendant leur propagation dans la cavité. Cette perte est consécutive à l'apparition d'instabilités paramétriques, qui se développent au cours de la propagation d'un laser de forte puissance dans un plasma. Ces instabilités peuvent conduire à l'éclatement du faisceau incident, ou à des diffusions importantes du rayonnement, provoquant des défauts d'irradiation de la cible de DT et des pertes importantes d'énergie. Connus depuis longtemps, ces phénomènes sont un domaine actif d'études théoriques et expérimentales car il n'est pas encore possible de prévoir quantitativement leur degré de nuisance. Ces instabilités sont sensibles, non seulement aux grandeurs caractéristiques du plasma (*température, densité de matière, vitesse d'écoulement*), mais aussi aux gradients de ces grandeurs, à l'éclairement laser, et à l'évolution hydrodynamique du plasma. De plus, ces instabilités ont des temps de croissance de l'ordre de la picoseconde, des échelles spatiales de l'ordre du micron, alors que le laser possède un temps de cohérence de l'ordre de plusieurs picosecondes et que le plasma évolue sur plusieurs millimètres pendant plusieurs centaines de picosecondes.

L'apparition de codes d'interaction laser-matière simulant la propagation d'un faisceau laser réaliste dans des plasmas chauds de grandes dimensions [1] a ouvert la voie à une modélisation globale de l'ensemble de ces phénomènes.

En même temps, les techniques dites de lissage optique appliquées aux lasers de puissance se sont généralisées. Le lissage optique contrôle les formes spatiale et temporelle de la tache focale. Ainsi, les premiers codes d'interaction ont combiné la description du faisceau optiquement lissé et sa propagation dans un plasma homogène. Les premières études de propagation se sont cantonnées à la transmission propre du faisceau à travers le plasma. Elles ont montré que le lissage optique réduit les instabilités conduisant à l'éclatement du faisceau (*filamentation*), ou à sa contraction (*autofocalisation*). Mais ce n'est que récemment que des codes simulant, à la fois, la propagation, la rétrodiffusion, et l'évolution hydrodynamique du plasma ont vu le jour. Le code HERA [2], développé au CEA - DAM - Île-de-France, en est l'illustration. Nécessairement parallèle, du fait des différentes échelles spatio-temporelles des mécanismes mis en jeu, il simule l'interaction laser-matière sur des plasmas millimétriques, et sur des centaines de picosecondes, en 3D.

L'année 2006 a marqué une étape importante pour le code HERA. Il a montré son aptitude à simuler des plasmas réalistes, y compris des cavités réduites dans le contexte du LMJ. La modélisation actuellement utilisée prend en compte la propagation du faisceau laser, sa rétrodiffusion de type *Brillouin*, et l'hydrodynamique complète du plasma dans la limite isotherme. Les premières applications du code ont mis en évidence un nouveau phénomène [3] qui donne une interprétation

plausible du désaccord persistant entre les niveaux de rétrodiffusions prévus par la théorie et ceux mesurés expérimentalement. Ce mécanisme, appelé "incohérence induite", est provoqué par la "diffusion Brillouin stimulée" dans un plasma inhomogène en vitesse. Il se traduit par un élargissement prononcé de l'ouverture des ondes rétrodiffusées et transmises, et par l'apparition d'incohérences spatiale et temporelle. Cet effet n'est pas associé au creusement de densité par la force pondéromotrice [4], mais par l'inhomogénéité propre du plasma. La figure 1 illustre l'impact de ces différents mécanismes sur la transmission dans un plasma représentatif d'expériences réalisées au Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI), à l'École polytechnique. Nous avons réalisé trois simulations différentes :

- sans le terme lié au creusement pondéromoteur (SBS seul) ;
- sans le terme lié à la diffusion Brillouin en milieu inhomogène (SF seul) ;
- avec les deux termes précédents (SF+SBS).

Les résultats montrent que :

- la transmission n'est pas limitée à l'ouverture incidente, dans le cas où seule la diffusion Brillouin est prise en compte ;
- la prise en compte simultanée de la diffusion Brillouin et de l'autofocalisation exacerbe cet étalement de la lumière. Ceci est aussi vrai en rétrodiffusion.

L'élargissement de l'onde rétrodiffusée peut atteindre des valeurs telles que plus de la moitié de la puissance rétrodiffusée est en dehors de l'ouverture initiale du faisceau : les mesures qui sont, en général, limitées au cône d'ouverture du faisceau incident ne sont plus représentatives du taux de rétrodiffusion réel.

Actuellement, seule la diffusion Brillouin stimulée est prise en compte. Les travaux suivants porteront sur l'instabilité Raman, et sur l'amélioration de la modélisation du plasma, en particulier sur le transport des électrons. Ces résultats récents et prometteurs démontrent que l'hydrodynamique du plasma est un élément essentiel pour l'estimation du degré de dangerosité des instabilités paramétriques dans les futures cavités LMJ.

Références

- [1] A. J. SCHMITT, "The effects of optical smoothing techniques on filamentation in laser plasmas", *Phys. Fluids*, **31**, p. 3079 (1988).
- [2] P. BALLEREAU, M. CASANOVA, F. DUBOC, D. DUREAU, H. JOURDREN, P. LOISEAU, J. METRAL, O. MORICE, R. SENTIS, "Simulation of the Paraxial Laser Propagation coupled with Hydrodynamics in 3D Geometry", à paraître dans *J. Scient. Comput.* (2007).
- [3] P. LOISEAU, O. MORICE, D. TEYCHENNÉ, M. CASANOVA, S. HÜLLER, D. PESME, "Laser-beam smoothing induced by stimulated Brillouin scattering in an inhomogeneous plasma", *Phys. Rev. Lett.*, **97**, p. 205001 (2006).
- [4] A. J. SCHMITT, B. B. AFEYAN, "Time-dependent filamentation and stimulated Brillouin forward scattering in inertial confinement fusion", *Phys. Plasmas*, **5**, p. 503 (1998).

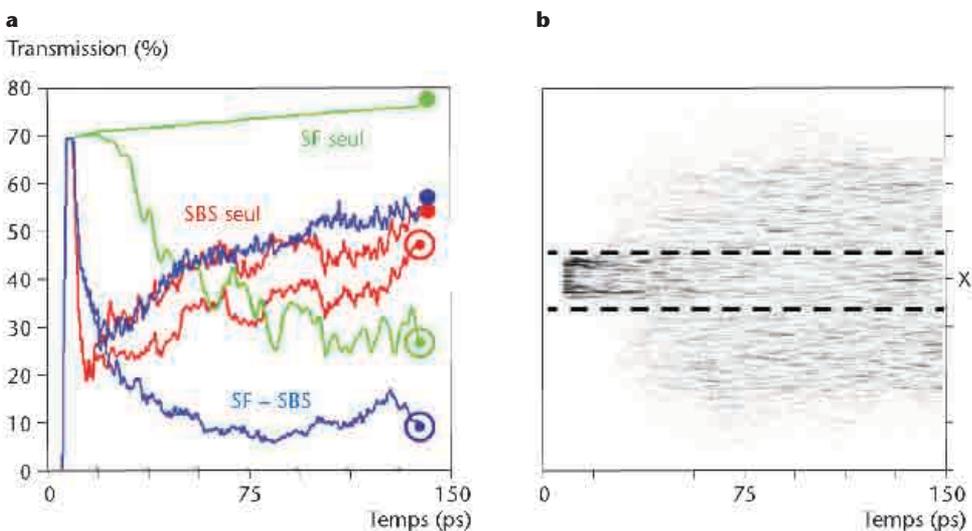


Figure 1

Évolution temporelle de la lumière transmise

a Évolution temporelle de la lumière transmise (à gauche). ⊙ indique une intégration dans le cône d'ouverture uniquement, et ● une intégration sur tout le domaine transverse ;

b Évolution temporelle de la puissance transmise en champ proche en fonction de la dimension transverse, en sortie de la boîte de simulation, après 1,2 mm de propagation. Les deux lignes en pointillés délimitent l'ouverture initiale du faisceau incident.

LES INSTABILITÉS PLASMAS : UN ENJEU POUR LE LMJ

C. ROUSSEAU, L. GRÉMILLET, S. BATON*
CEA - DAM - Île de France, *CNRS - LULI

Le contrôle des instabilités plasmas constitue un défi important pour la réussite du confinement inertiel sur le Laser Mégajoule (LMJ). Il faut maîtriser ce phénomène, complexe à modéliser à cause de l'imbrication de l'hydrodynamique, des couplages d'ondes, et de la cinétique du plasma. Pour ne rien simplifier, les échelles de temps et d'espace associées au phénomène, la picoseconde et le micron, rendent difficiles les confrontations entre la théorie et l'expérience.

Dans l'expérience décrite ici, nous présentons une mesure très complète, qui associe, pour la première fois, des rétrodiffusions Raman et Brillouin excitées par un laser picoseconde et diagnostiquées par diffusion Thomson, avec une résolution temporelle très fine de 0,4 ps. L'amélioration de la résolution, de deux ordres de grandeurs par rapport aux expériences précédentes, permet la confrontation directe avec les calculs numériques issus de codes particuliers bidimensionnels. À cette échelle de temps, la cinétique électronique est la source de saturation la plus rapide et la plus violente de la rétrodiffusion Raman.

L'expérience et l'interprétation ont été réalisées en collaboration avec des équipes du CNRS - École polytechnique.



Contexte de l'expérience

La compréhension des mécanismes de saturation des instabilités paramétriques reste d'actualité pour la fusion par confinement inertiel (FCI) par laser. Le contrôle des instabilités plasmas, comme les diffusions Raman ou Brillouin stimulées, est important car, en réfléchissant la puissance incidente laser et/ou en la redistribuant à l'intérieur de la cavité qui renferme le microballon fusible, elles dégradent le couplage laser au point de réduire l'efficacité d'implosion à des niveaux inacceptables. La modélisation de cette saturation constitue ainsi un enjeu important pour la réussite des expériences laser-plasma sur le LMJ.

Les nombreuses expériences d'interaction laser-plasma en impulsions nanosecondes mettent couramment en évidence des comportements "inattendus" des instabilités, c'est-à-dire évoluant dans un sens contraire à ce que la loi d'échelle de l'instabilité seule laisserait supposer. Le couplage, dans le plasma, des ondes issues des différentes instabilités – primaires et secondaires – constitue, bien sûr, une raison essentielle [1]. Cependant, l'interprétation invoque de plus en plus souvent le rôle des phénomènes cinétiques dans le plasma, qui peuvent modifier considérablement les propriétés de l'interaction.

Par exemple, les populations électroniques ou ioniques suprathermiques (issues du piégeage par les ondes plasmas électroniques – pour le Raman – ou les ondes acoustiques ioniques – pour le Brillouin), amplifiées par ces instabilités, rendent les fonctions de distribution des vitesses des particules non-maxwelliennes et modifient sensiblement les coefficients de transport et les amortissements des ondes, par rapport à leurs valeurs dans un plasma maxwellien [2], [3]. Une complication supplémentaire provient du temps très court de croissance des instabilités plasmas qui saturent en quelques ps, alors que les impulsions lasers sont 1 000 fois plus longues, et que la résolution temporelle des caméras à balayage de fente couramment utilisées est de ~ 30 ps. En conséquence, les données expérimentales sont analysées en relation avec des modèles de saturation en régime asymptotique, moyennés sur quelques dizaines de ps. L'utilisation d'un diagnostic picoseconde, tel qu'une sonde Thomson de courte durée, constitue une alternative intéressante. Il peut mettre en évidence, à l'échelle de la picoseconde, la croissance et la compétition des ondes électrostatiques générées par les rétrodiffusions Raman (SRS) et Brillouin (SBS) à partir de conditions initiales connues, durant leurs phases linéaires de croissance, ainsi que d'éventuelles

manifestations non-linéaires violentes dans les premiers instants de saturation. Enfin, du fait de leur brièveté, ces expériences peuvent être simulées complètement, puis analysées finement à l'aide de codes cinétiques, ce qui permet, en principe, d'identifier l'évolution de phénomènes rapides qui interviennent lorsque les instabilités atteignent leur niveau de saturation.

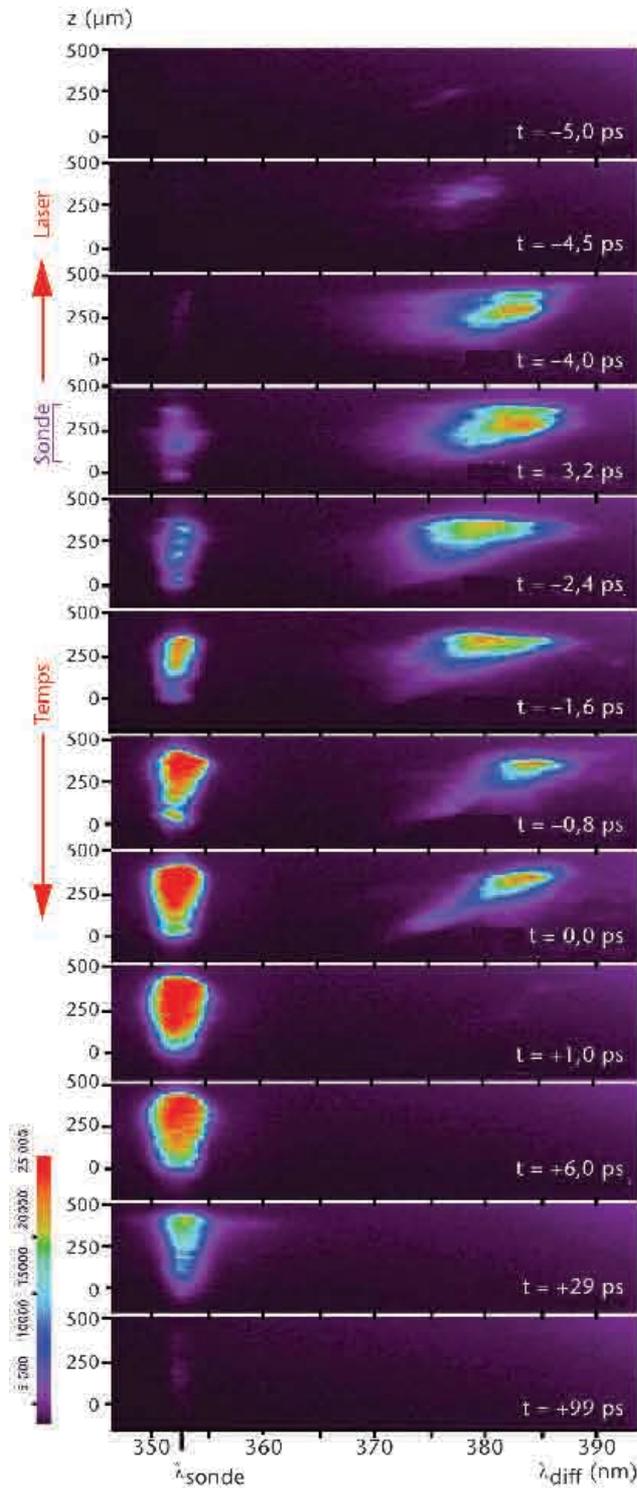


Figure 1 Évolution temporelle des IAW (autour de λ_{sonde}) et EPW (vers 385 nm). Mêmes filtrage et échelle de couleur pour chaque spectre.

Expériences et résultats

La première expérience de ce type a eu lieu sur l'installation 100 TW du LULI (École polytechnique) [4]. Les coïncidences spatiales et temporelles fines des faisceaux lasers utilisés nécessitent de bonnes conditions de reproductibilité de tir et de stabilité du montage optique.

Le plasma d'interaction est obtenu en irradiant un jet de gaz d'hélium à l'aide d'un premier faisceau laser nano-seconde. Le faisceau principal, ou pompe, de durée 1,5 ps et centré à $\lambda = 1,059 \mu\text{m}$, est focalisé à f/8 dans ce plasma sur une tache focale de diamètre 15 μm . À cet instant, les calculs hydrodynamiques 2D indiquent que la densité électronique du plasma est proche de $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et que sa température électronique est voisine de 300 eV. En se propageant dans ce plasma, la pompe excite les rétrodiffusions Raman et Brillouin. Les ondes plasma électroniques (EPW) et acoustiques ioniques (IAW) associées à ces instabilités sont analysées à l'aide d'un faisceau sonde Thomson à 0,353 μm et de durée 0,3 ps. Le retard entre la sonde et la pompe est ajusté, de tir en tir, à l'aide d'une ligne à retard optique. À chaque tir laser, nous obtenons une image spectrale des instabilités, résolue spatialement le long de la propagation du faisceau principal, à l'instant donné par ce retard. L'histoire des instabilités est obtenue en variant ce délai optique.

La figure 1 (spectres) et la figure 2 (intensités) représentent les évolutions temporelles des EPW et IAW stimulées. Le scénario qui suit a été maintes fois reproduit dans des plasmas de densités variables et sur une grande plage d'intensités lasers (entre 10^{16} W/cm^2 et 10^{18} W/cm^2). Nous constatons que les ondes plasmas du Raman sont les premières excitées, dans le front de montée de la pompe. Leur saturation est atteinte en $\sim 1 \text{ ps}$.

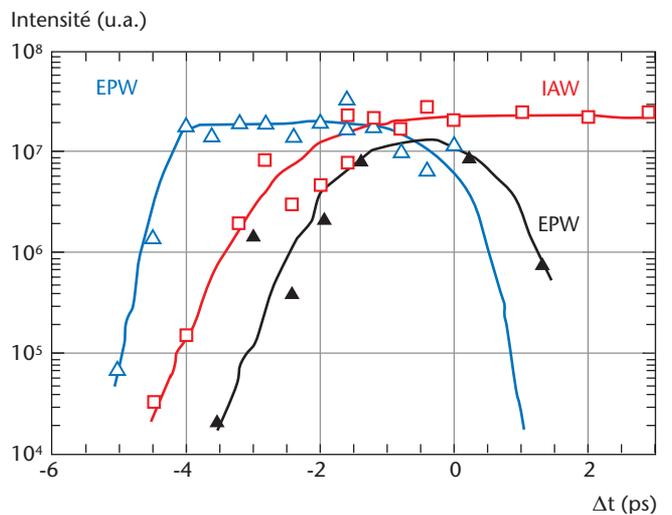


Figure 2 Croissances des IAW et EPW déduites de la figure 1. En noir, croissance des EPW pour une faible intensité de pompe ($7 \times 10^{15} \text{ Wcm}^{-2}$), pour laquelle l'amplitude des IAW demeure trop faible.

Les ondes sonores du *Brillouin* se développent plus lentement et présentent des modulations spatiales clairement visibles durant la croissance, qui dure ~ 3 ps. Les deux instabilités coexistent jusqu'au voisinage du maximum de la pompe. Puis les ondes plasmas disparaissent brusquement, tandis que les ondes sonores s'amortissent lentement en demeurant mesurables jusqu'à 100 ps après le passage de la pompe. Notons la largeur spectrale particulièrement importante des IAW qui dépasse nettement la largeur instrumentale (1,5 nm). Ceci est probablement dû à une profonde modification des distributions des vitesses électronique et ionique.

Discussion

En présence d'une impulsion laser à front de montée raide, cette chronologie s'accorde avec la théorie linéaire, qui prédit que l'instabilité caractérisée par le taux de croissance le plus rapide se manifeste la première [1]. Les informations apportées par les calculs numériques particulières sont incomparablement plus riches. Nous privilégions ici la discussion sur l'aspect temporel, en s'appuyant sur des simulations en géométrie bidimensionnelle qui tiennent compte de manifestations importantes, comme la diffusion et le chauffage cinétique latéraux, l'autofocalisation, ou la création de canaux de densité. La tranche de plasma a une longueur de 450 μm sur 220 μm de large. L'impulsion laser reprend les caractéristiques lasers expérimentales, et le calcul s'est étendu sur 5 ps. Présentée en figure 3, la chronologie relative des instabilités est bien reproduite, avec, en particulier, l'effondrement du *Raman* vers le sommet de l'impulsion, c'est-à-dire à un instant où l'intensité de la pompe est très forte. L'analyse de l'espace des phases montre que la chute du *Raman* coïncide avec une sévère distorsion de la fonction de distribution électronique, qui étend le piégeage particulaire dans l'onde plasma du *Raman* jusqu'aux vitesses thermiques.

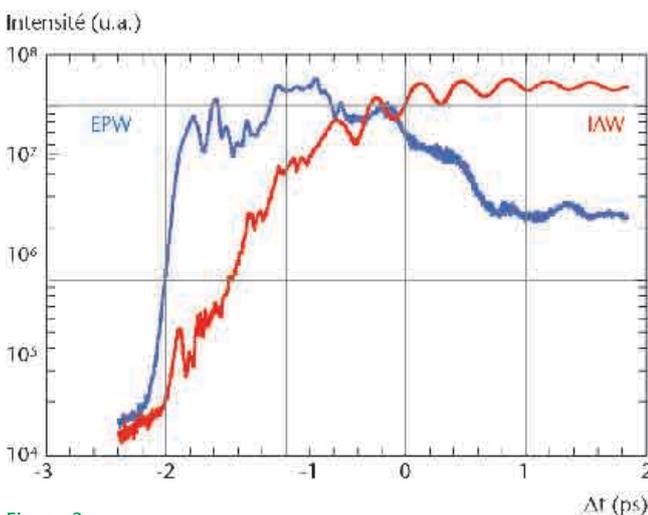


Figure 3 Amplitudes relatives $\langle \delta n/n \rangle$ des EPW et IAW en fonction du temps, données par le calcul PIC 2D. L'origine $\Delta t = 0$ correspond au maximum de l'impulsion atteignant le centre de la boîte.

D'autres calculs avec ions fixes reproduisent l'évolution du *Raman* pratiquement à l'identique, ce qui permet d'écarter l'origine ionique comme cause majeure de saturation du *Raman* sur cette échelle de temps. Cette hypothèse est appuyée expérimentalement par des tirs à intensité faible pour laquelle l'instabilité *Brillouin*, plus lente que le *Raman*, n'a pas le temps de croître durant le passage de la pompe (figure 2) : nous avons constaté la disparition rapide des ondes plasmas du *Raman*, toujours vers le pic de la pompe laser. De ce fait, l'origine cinétique électronique du plasma semble la mieux placée pour expliquer cette saturation brutale.

Il s'agit de la première mesure des instabilités plasma résolue à l'échelle de la sub-picoseconde

En résumé, le développement simultané des ondes électrostatiques des rétrodiffusions *Raman* et *Brillouin* a été expérimentalement mesuré avec une résolution temporelle sub-picoseconde encore jamais atteinte. Sur cette échelle de temps de quelques ps, les mesures se comparent favorablement avec les calculs des codes particuliers. Le piégeage électronique semble être la cause majeure de la saturation du *Raman*. Ces études aident à la compréhension des mécanismes de saturation des instabilités plasmas, sujet critique pour le programme FCI.

Remerciements

Les simulations numériques ont été, en majeure partie, réalisées par J.-C. ADAM et A. HÉRON, du Centre de physique théorique de l'École polytechnique.

Références

- [1] D. PESME, "La fusion thermonucléaire inertielle par laser", Part. 1, vol. 1, ch. II, Ed. Eyrolles (1993).
- [2] B. B. AFEYAN et al., "Kinetic theory of electron-plasma and ion-acoustic waves in nonuniformly heated laser plasmas", *Phys. Rev. Lett.*, **80**, p. 2322 (1998).
- [3] A. V. BRANTOV et al., "Nonlocal electron transport in laser heated plasmas", *Phys. Plasmas*, **5**, p. 2742 (1998).
- [4] C. ROUSSEAU, L. GRÉMILLET, M. CASANOVA, P. LOISEAU, M. LE GLOAHEC, S. BATON, F. AMIRANOFF, J. ADAM, A. HÉRON, "Transient development of backward stimulated Raman and Brillouin scattering on a picosecond time scale measured by subpicosecond Thomson diagnostic", *Phys. Rev. Lett.*, **97**, p. 015001 (2006).

SUCCÈS DES PREMIÈRES EXPÉRIENCES OUVERTES SUR LA LIL

G. SCHURTZ

CELIA - UMR 5107 - Université de Bordeaux I / CNRS / CEA

La Ligne d'Intégration Laser (LIL) a produit, en décembre 2005, une série de tirs de puissance destinés à une campagne d'expérience de physique des plasmas. Il s'agit en fait de la première campagne d'expériences "ouvertes", c'est-à-dire réalisées pour les besoins de la recherche académique.

L'expérience, proposée par le CELIA suite à un appel d'offre de l'Institut des Lasers et Plasmas, a été préparée et conduite par une équipe réunissant des physiciens du CELIA, de l'École Polytechnique, de la Direction des sciences de la matière du CEA, et du CEA - DAM. Elle avait pour but de mesurer la vitesse de l'onde thermique induite par l'éclairement laser dans une cible solide, dans des conditions comparables à celles qui règneront dans les cibles de fusion par confinement inertiel qui seront expérimentées sur le Laser Mégajoule (LMJ) [1].

La conduction thermique électronique et sa modélisation

Les codes de simulation numériques sont des outils indispensables pour interpréter les expériences réalisées auprès des lasers. Lorsqu'ils sont utilisés pour le dimensionnement de grandes installations, comme le LMJ, ils doivent aussi être prédictifs, et leur validation revêt une grande importance. L'implosion d'une cible de Fusion par Confinement Inertiel (FCI) repose sur la conversion en énergie mécanique de l'énergie laser. Un agent essentiel de cette conversion est la conduction thermique électronique. Sa modélisation théorique constitue donc un point clé de la compréhension et du dimensionnement des cibles.

La théorie de *Spitzer* et *Harm* décrit, en principe, convenablement la conduction thermique dans un plasma créé par laser. Néanmoins, la restitution numérique des expériences démontre que le flux de *Spitzer* surestime largement le flux réel et il est d'usage, dans les codes de simulation, de le limiter, au moyen d'un coefficient ajustable. Le recours à cette limitation *ad-hoc* affaiblit considérablement le caractère prédictif des codes de simulation, et il paraît important de s'en affranchir, ou, pour le moins, de le justifier par la théorie.

Au moins deux mécanismes expliquent cette apparente inhibition du flux de chaleur :

- en présence des forts gradients induits par l'éclairement laser, l'hypothèse d'équilibre thermodynamique local sur laquelle repose la théorie de *Spitzer* est remise en cause : le flux de chaleur est délocalisé. Il est, dans ce cas, sensiblement réduit.
- les estimations théoriques indiquent que des champs magnétiques intenses sont auto-générés par le plasma dès que l'écoulement n'est plus monodimensionnel. Les électrons, contraints à parcourir des spirales autour des lignes de champ, transportent mal la chaleur, et la conductivité thermique est fortement réduite. Il apparaît un flux de chaleur dans la direction perpendiculaire au gradient de température. C'est l'effet *Righi Leduc*.

Récemment, les physiciens du CELIA ont développé et introduit dans le code CHIC un modèle du flux de chaleur qui prend en compte ces deux effets [2], [3]. C'est la volonté de valider expérimentalement ce nouvel outil théorique qui a conduit à définir l'expérience de décembre 2005.

L'expérience

Le code CHIC est utilisé pour le dimensionnement de cibles de FCI, c'est pourquoi il était important de réaliser l'expérience dans des conditions proches de celles qui seront rencontrées sur le LMJ : longueur d'impulsion de quelques ns, intensités comprises entre $5 \cdot 10^{14}$ W/cm² et $2 \cdot 10^{15}$ W/cm², tache focale lissée. La LIL, prototype du LMJ, était donc l'instrument idéal.

Le principe de l'expérience consiste à caractériser la progression de l'onde thermique électronique dans un disque de matière plastique, matériau figurant l'ablateur de la cible à gain. Dans ce but, nous insérons dans la cible deux feuilles très minces de matériaux de numéros atomiques voisins, dont le rayonnement caractéristique signale l'arrivée de l'onde thermique (figure 2). Le choix s'est porté sur le couple vanadium-titane dont les raies héliumoides, produites à 5 200 eV et à 4 800 eV, sont proches et aisément identifiables. Le temps qui sépare l'émission des deux marqueurs permet de remonter à la vitesse de l'onde thermique. Elle est ensuite comparée aux prédictions théoriques.

Le diagnostic principal était constitué d'un cristal de carbone, pour collecter et disperser spectralement le rayonnement X issu de la cible, d'une photocathode, et d'une caméra à balayage de fente. Ce dispositif, imaginé et mis au point par les équipes du CEA - DAM, mesure, avec une résolution temporelle d'environ 50 ps, le spectre issu de la cible. La figure 2b montre une image typique produite par ce diagnostic.

La figure 1 présente les résultats de 3 des 7 tirs réalisés au cours de la seconde semaine de décembre 2005, obtenus pour la même cible, mais pour des énergies lasers différentes. Comme l'onde thermique est d'autant plus rapide que le plasma est plus chaud, l'intervalle temporel des deux émissions décroît avec l'énergie E

de l'impulsion. Une première estimation théorique repose sur le modèle stationnaire d'ablation par laser [4]. Il dit que le taux de masse ablatée varie comme l'intensité à la puissance 1/3, ce qui indique que le temps mis par l'onde thermique décroît comme $E^{-1/3}$. L'examen de la figure 1 indique que l'expérience vérifie assez fidèlement cette loi d'échelle.

Accord théorie-expérience ?

Le modèle théorique qui décrit l'évolution à l'échelle de plusieurs nanosecondes d'un plasma créé par laser est un modèle fluide, qui rend compte de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement, et de l'énergie du plasma. Les équations correspondantes sont résolues conjointement avec celles qui décrivent le transport d'énergie par conduction thermique, par rayonnement X, ainsi que la propagation et l'absorption de la lumière laser. C'est cet ensemble d'équations aux dérivées partielles qui est programmé, en deux dimensions d'espace, dans le code de simulation CHIC. Le code est agrémenté de logiciels de post-traitement des données qui simulent les diagnostics. Les résultats expérimentaux obtenus sont, aux trois énergies, correctement reproduits au moyen de simulations bidimensionnelles, mais à condition de limiter le flux de chaleur, et, surtout, de changer de limiteur quand l'intensité change !

À partir de là, il était tentant d'utiliser le modèle de conduction non local programmé dans CHIC, ce qui a été fait pour la simulation du tir à énergie médiane de 7 kJ. Dans ce cas, nous constatons avec surprise que ce modèle prédit un temps de transit plus court encore que le flux de Spitzer non limité, alors qu'il prédit une réduction sensible du flux en monodimensionnel. Ceci est dû au fait que le flux non local inhibe surtout le flux transverse et réduit fortement les pertes latérales.

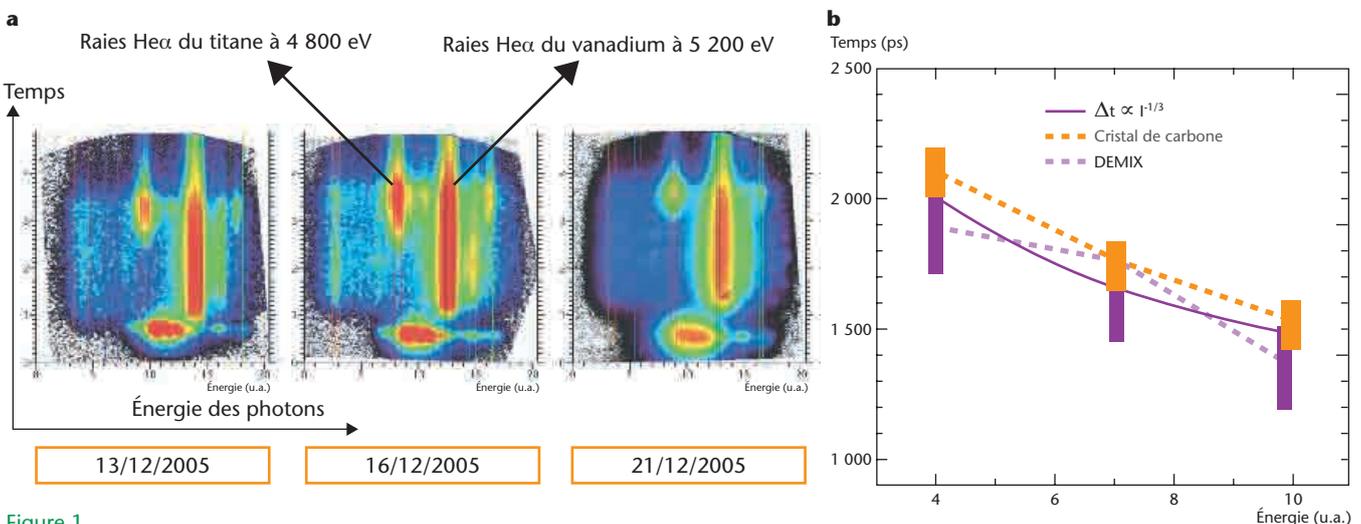


Figure 1 Images obtenues lors de l'expérience au moyen de cibles identiques, pour trois énergies lasers. La dispersion spectrale et le balayage temporel fournissent l'émission radiative de la cible dans le plan (énergie, temps) (a). L'analyse de ces images fournit les décalages temporels (en orange sur la figure 1b). Cette mesure est cohérente avec celles obtenues par le diagnostic DEMIX, représentées en violet. Un modèle analytique d'ablation prédit que le taux de masse ablaté varie comme l'intensité laser à la puissance 1/3 (trait plein sur la figure 1b).

Ce point avait déjà été observé dans le cadre de simulations cinétiques [5]. La chaleur demeure confinée le long de l'axe de symétrie de la cible, favorisant une pénétration rapide. Les effets bidimensionnels sont donc ici déterminants. Or, un effet bidimensionnel important est la présence de champ magnétiques auto générés. En géométrie axisymétrique (rz), les lignes de champ sont des cercles d'axe zz' . Dans la géométrie de l'expérience, B_θ est négatif, donc l'effet *Righi Leduc* provoque une rotation rétrograde du flux de chaleur. Le flux, orienté vers l'intérieur de la cible dans le cas de *Spitzer*, comporte à présent une composante latérale. La combinaison des deux effets magnétiques, inhibition du flux longitudinal et apparition du flux transverse, augmente sensiblement le temps de parcours de l'onde thermique relativement à *Spitzer* (figure 2). Faut-il pour autant exclure la présence d'effets non locaux ? Un calcul complet, incluant délocalisation et champs magnétiques prouve le contraire (figure 2). Les effets non locaux, qui réduisent la condition latérale, modèrent aussi l'effet *Righi Leduc*. Le décalage temporel d'émission des deux traceurs est alors bien restitué par ce modèle.

Conclusion

L'expérience de flux de chaleur sur la LIL a été l'occasion de valider non seulement un code de calcul, mais aussi la mise en œuvre pratique, au quotidien, de l'ouverture des installations lasers du CEA - DAM. Elle doit être considérée comme un succès, par l'abondance et la qualité des résultats expérimentaux obtenus, et par son apport à la modélisation théorique des plasmas de fusion.

Elle est également un succès à porter au crédit d'une collaboration efficace entre les unités du CEA - DAM et des laboratoires extérieurs, dans le cadre d'une grande installation. Elle a bénéficié du soutien de l'Institut des Lasers et Plasmas, mais aussi d'un fort investissement des équipes du CEA - DAM - Île-de-France pour la conception et la mise au point de l'expérience, et celles du CEA -Cesta pour sa réalisation.

L'interprétation de l'expérience suggère la création de champs magnétiques intenses, qu'il est très difficile de mesurer directement. Une telle mesure sera possible au moyen de la future installation PETAL, qui utilisera simultanément les faisceaux de la LIL et un faisceau de très haute intensité, par le procédé de radioprotonographie.

Références

[1] G. SCHURTZ, S. GARY, S. HULIN, J.-C. GAUTHIER, C. FOURMENT, "Revisiting Non Local Energy Transport in Inertial Fusion Conditions", *Phys. Rev. Lett.*, **98**, p. 095002 (2007).
 [2] G. SCHURTZ, P. NICOLAÏ, M. BUSQUET, "A nonlocal electron conduction model for multidimensional radiation hydrodynamics codes", *Phys. Plasmas*, **7**, p. 4238 (2000).
 [3] P. NICOLAÏ, J.-L. FEUGEAS, G. SCHURTZ, "A practical nonlocal model for heat transport in magnetized laser plasmas", *Phys. of Plasmas*, **13**, p. 32701 (2006).
 [4] R. DAUTRAY, J.-P. WATTEAU, "La fusion inertielle par laser", Ed Eyrolles (1993).
 [5] E. EPPERLEIN, G. J. RICKARD, A. BELL, "Two dimensional non local electron transport in laser produced plasmas", *Phys. Rev. Lett*, **61**, p. 2453 (1988).

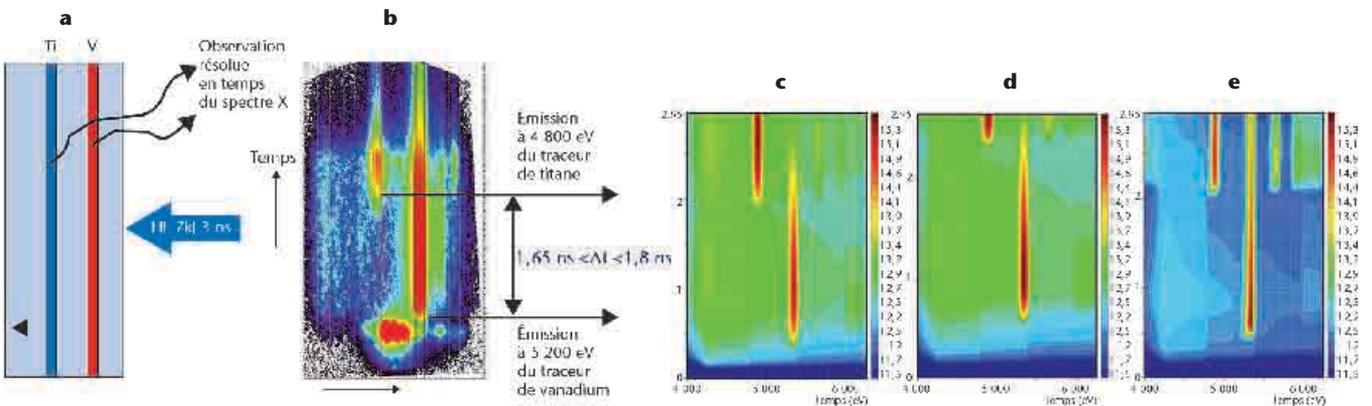


Figure 2 Mesures des émissions successives de deux traceurs métalliques minces insérés dans une cible plane de matière plastique (a). La durée qui sépare l'émission des deux traceurs donne la vitesse de l'onde thermique (b). (c) simulation avec le modèle de conduction de *Spitzer* et *Harm* : le décalage temporel obtenu est de 1,5 ns environ, non compatible avec l'observation (b) ; (d) simulation avec un modèle de génération et de transport de champs magnétiques, et le modèle de conduction de *Braginskii*. Le retard à l'émission du second traceur (1,85 ns) est en borne haute de la barre d'erreur. (e) prise en compte couplée des champs magnétiques et des effets non locaux. Elle fournit un décalage de 1,75 ns, en meilleur accord avec la mesure.

LA LIGNE D'INTÉGRATION LASER (LIL)

A. ROUSSEL
CEA - Cesta

La Ligne d'Intégration Laser (LIL) (figure 1) est un laser destiné initialement à tester les choix technologiques faits par les équipes du CEA - DAM pour réaliser le Laser Mégajoule (LMJ) (30 chaînes de 8 faisceaux). Elle est constituée d'une seule chaîne de 8 faisceaux lasers élémentaires, et a été équipée pour être un instrument scientifique pour la physique des plasmas [1].

Elle est implantée sur le site du CEA - Cesta, en Aquitaine, qui fait partie du pôle de compétitivité "Route des Lasers". Ce pôle, fortement soutenu par le Conseil Régional d'Aquitaine, a été créé pour fédérer, dynamiser et coordonner les retombées industrielles, de recherche et de formation dues à l'implantation locale du programme LMJ. Dans le domaine de la recherche par exemple, un Institut des Lasers et Plasmas (ILP) a été créé et regroupe les acteurs français de la recherche dans les domaines des lasers et des plasmas. L'ILP organise l'accès des chercheurs impliqués dans l'utilisation de la LIL, et plus tard du LMJ, pour des expériences de type académique.



Le schéma de base d'un faisceau de la LIL se décompose en quatre modules principaux (figure 2) :

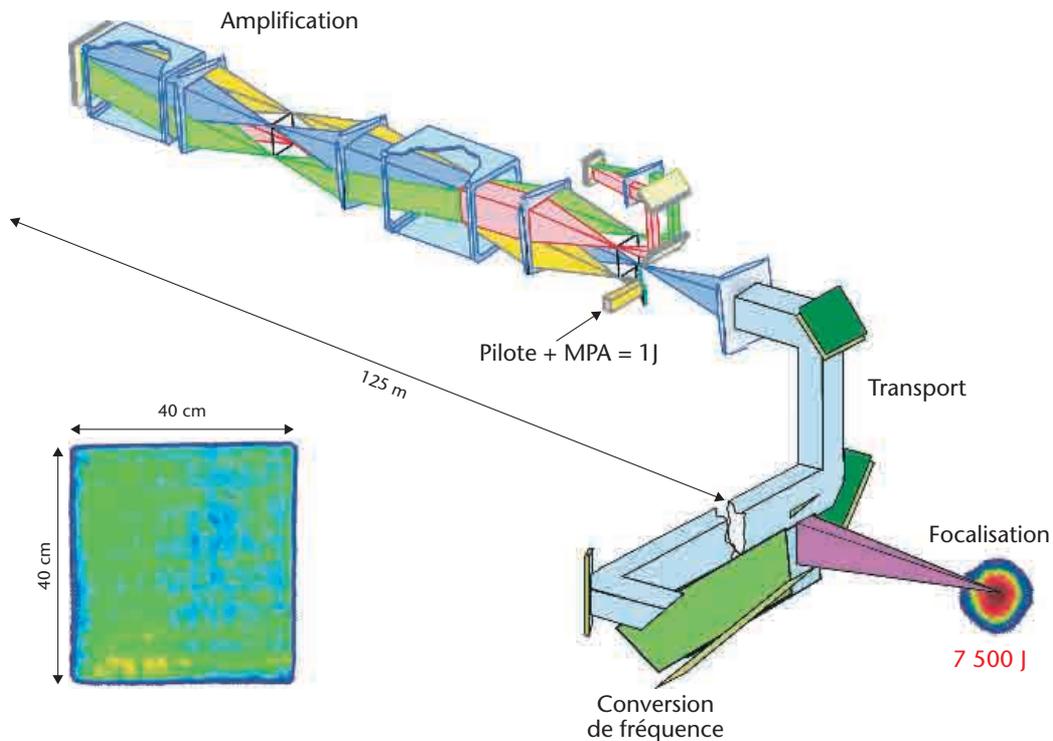
- le générateur de l'impulsion : le pilote ;
- la section amplificatrice, qui comprend deux étages d'amplification de puissance ;
- la section de transport du faisceau, qui regroupe 4 faisceaux lasers (*quadruplet*) au moyen d'un ensemble de 6 grands miroirs portés par une structure métallique complexe et rigide ;
- le bloc optique du Système de Conversion de fréquence et de Focalisation (SCF).



Figure 1
Le bâtiment de la LIL et le bâtiment du LMJ, au CEA - Cesta.

Droits photographiques : société Vertigo

Figure 2
Schéma de principe d'un faisceau laser élémentaire.



Le pilote génère l'impulsion laser initiale à la longueur d'onde fondamentale de 1 053 nm. Cette impulsion initiale est injectée dans la chaîne amplificatrice sous forme d'un faisceau monomode de section carrée de 40 mm de côté. Il s'agit donc d'un laser servant de source de lumière pour les tirs de puissance, et aussi de moyen d'alignement pour les chaînes. Le pilote comprend la source et le Module Pré-Amplificateur (MPA). Le rôle de la source est de fournir les caractéristiques temporelles et spectrales du faisceau final, tandis que celui du MPA est d'en façonner les caractéristiques spatiales et énergétiques. Les énergies à fournir pour les modes "alignement" et "tirs" varient de quelques millijoules à 1 joule.

L'architecture de la section amplificatrice permet à l'impulsion injectée d'effectuer 4 passages (grâce à un dispositif de type "demi-tour") à travers les amplificateurs, afin d'optimiser l'extraction de l'énergie stockée dans ces amplificateurs. Chaque faisceau constitutif de la chaîne peut délivrer, en sortie de section amplificatrice, une impulsion d'une durée d'environ 5 ns et d'une énergie d'une vingtaine de kilojoules à une longueur d'onde de 1 053 nm. La chaîne est longue de 105 mètres, haute de près de 2,5 mètres, large de plus de 1,8 mètres.

À la sortie de la section amplificatrice, le faisceau se propage jusqu'au SCF sur une distance de 45 m en se réfléchissant sur 6 miroirs de transport. Le SCF est destiné, d'une part à transformer un groupe de 4 faisceaux infrarouges ($\lambda_{IR} = 1\ 053\ \text{nm}$) amplifiés en faisceaux ultraviolets ($\lambda_{UV} = 351\ \text{nm}$), grâce à 2 cristaux de KDP (*dihydrogène phosphate de potassium*) utilisant des effets optiques non-linéaires, d'autre part à focaliser, en un seul point de la cible, les 4 faisceaux UV grâce à des réseaux de diffraction à traits courbes.

A ce jour, la LIL dispose de 4 faisceaux à 0,35 μm , pouvant fournir chacun, en nominal, 6,5 kJ en 5 ns, ou 1,6 TW en 700 ps. Il s'agit donc avec le LLE de l'Université de Rochester (*États-Unis*) des deux lasers les plus énergétiques actuellement en fonctionnement dans le monde. Instrument scientifique au service des programmes de physique du CEA - DAM, la LIL est aussi ouverte à la communauté académique internationale depuis 2005, date à laquelle a eu lieu la première expérience ouverte (voir article de G. SCHURTZ, dans ce numéro).

Références

[1] La ligne d'intégration laser, chocs, 29 (2004).

DES NANOCAVITÉS CRÉÉES PAR LASER

L. HALLO*, **, A. BOURGEADE*, V. T. TIKHONCHUK**, P. NICOLAÏ*, **

* CEA -Cesta, ** CELIA - UMR 5107 - Université Bordeaux 1 / CNRS / CEA

Dans la gamme de longueur d'onde 800 nm – 10,6 μm les matériaux diélectriques sont généralement transparents pour un rayonnement laser dont l'énergie n'excède pas quelques joules/cm². Au-delà de ce seuil, des phénomènes d'interaction entre le rayonnement laser et le diélectrique peuvent apparaître. Un de ces phénomènes, appelé "claquage", peut modifier la structure du diélectrique en créant au sein du matériau des inhomogénéités structurales. L'origine de ce phénomène est due à l'ionisation partielle du matériau, créant localement un plasma qui devient absorbant, et provoque un échauffement violent et une dilatation. Dans les cas extrêmes, des microfissures peuvent apparaître dans le matériau, mais, en général, ce sont des cavités qui sont produites par l'expansion du plasma au sein même du matériau.

Pour éviter l'apparition de ces phénomènes, ou au contraire les utiliser pour façonner le matériau en vue d'applications, il est nécessaire de comprendre les mécanismes qui vont produire une absorption locale dans un diélectrique, et éventuellement se poursuivre par une micro explosion. En effet, au delà des problèmes d'endommagement, toute une catégorie d'applications est envisageable. Nous pouvons, par exemple, utiliser ce phénomène pour créer des nanocavités de taille contrôlée dans des diélectriques. Une de ses applications pourrait être le stockage à haute densité d'informations.

Nous présentons un modèle physique et sa validation sur des résultats expérimentaux. Les applications d'un tel modèle sont nombreuses, nous en décrivons quelques unes.



L'interaction d'une impulsion laser ultracourte (*qq centaines de femtosecondes*) avec un diélectrique transparent est un domaine d'intérêt pour le traitement des matériaux. Par rapport aux métaux, où l'interaction laser-matière est localisée dans une couche surfacique étroite, les diélectriques permettent de déposer de l'énergie à l'intérieur même du matériau. Les expériences récentes [1], [2] montrent qu'il est possible de focaliser l'impulsion laser dans une zone dont la dimension est de quelques dixièmes de la longueur d'onde du laser.

Nous présentons un modèle théorique et sa réalisation numérique [3] afin de décrire la formation d'une cavité dans un diélectrique transparent, à l'aide de la focalisation intense d'une impulsion laser ultra-courte. La physique mise en jeu est complexe, mais le processus peut se décomposer en deux étapes. La première consiste

à décrire la focalisation puis la diffraction de l'impulsion laser. La deuxième étudie les conséquences hydrodynamiques du dépôt d'énergie réalisé.

La résolution des équations de *Maxwell* est nécessaire car la zone de focalisation est plus petite que la longueur d'onde. Le système d'équations est couplé, par l'intermédiaire du courant, à des équations décrivant l'évolution locale des électrons. L'originalité de notre approche est de coupler également l'ionisation multiphotonique instantanée aux équations de *Maxwell* bidimensionnelles. Le système différentiel résultant est "raide" car le courant multiphotonique varie comme la puissance onzième du champ électrique pour une ionisation à six photons. Le calcul fournit le dépôt d'énergie consécutif au passage de l'impulsion laser dans le matériau, et le bilan énergétique complet qui donne la réflexion et la transmission de l'impulsion.

Le dépôt d'énergie produit à la fois une onde de choc divergente et une onde de détente convergente. La focalisation de l'onde de détente au centre de la zone de dépôt est à l'origine de la formation de la cavité, puisqu'elle produit une onde divergente qui "creuse" la matière sur son passage. Cette expansion au sein du matériau solide a une durée de vie limitée car elle doit surmonter les forces de cohésion de la matière : après quelques centaines de picosecondes, les pressions dans la cavité et dans le solide s'équilibrent, ce qui stoppe le processus d'expansion. Ce processus, typiquement hydrodynamique, est décrit par le code CHIC.

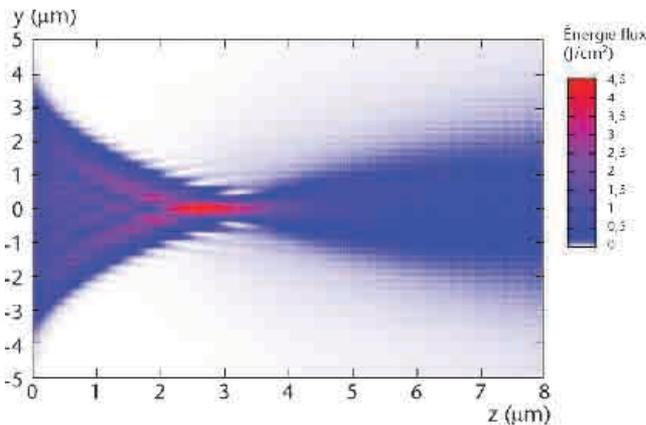


Figure 1 Flux d'énergie (J/cm^2) pour l'intensité laser de $420 \text{ TW}/cm^2$. La zone d'absorption qui permettra de former la cavité est centrée en $z = 3 \mu\text{m}$.

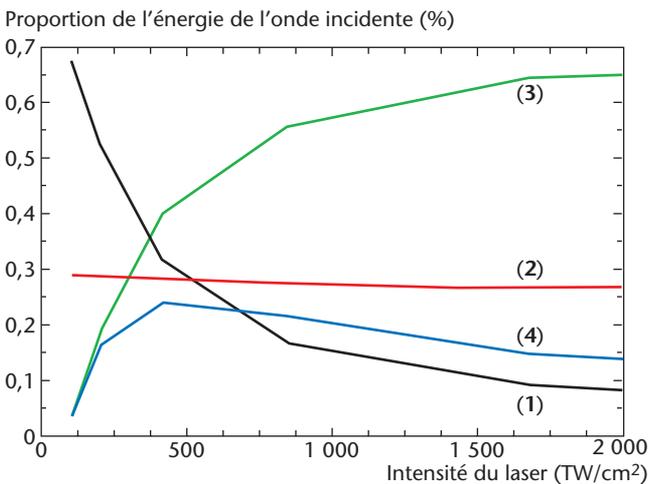


Figure 2 Contributions au bilan d'énergie en fonction de l'intensité du laser (en pourcentages) après irradiation d'une cible de silice.

(1) Énergie transmise dans le matériau ; (2) énergie réfléchié ; (3) énergie absorbée dans tout le matériau ; (4) énergie effectivement absorbée dans le volume focal. Sur cette courbe, nous voyons que l'intensité laser optimale pour la formation d'une cavité est de $450 \text{ TW}/cm^2$. Pour des intensités inférieures à $100 \text{ TW}/cm^2$, la formation de la cavité est réversible. Pour des intensités supérieures à $1200 \text{ TW}/cm^2$, le dépôt d'énergie se fait de la surface de la cible jusqu'au volume focal, l'ablation est totale, et il n'est plus possible d'identifier de cavités.

L'onde de détente initie une cavité

La formation de nanocavités dans les diélectriques fait partie des applications potentielles de ce modèle. Le faisceau laser est concentré dans le matériau avec une ouverture de 110 degrés, ce qui produit l'ionisation partielle du diélectrique, et l'absorption d'une partie de l'énergie du laser. Trois régions peuvent être distinguées dans le diélectrique comme le montre la figure 1 pour une intensité maximale du laser de $420 \text{ TW}/cm^2$. Les trois régions sont la zone de focalisation, la zone d'absorption, et la zone de diffraction. La largeur de la zone de focalisation est petite devant la taille du faisceau (moins d'un micromètre), et la longueur vaut quelques micromètres. Le dépôt d'énergie a donc une forme de cigare (figure 1). Les simulations ont été réalisées pour différentes intensités du laser, et nous avons étudié le bilan énergétique détaillé entre l'énergie absorbée, l'énergie transmise et l'énergie réfléchié (figure 2). Le maximum d'énergie absorbée se situe aux environs de $450 \text{ TW}/cm^2$. Le coefficient d'absorption est de 25 à 30 %.

Au voisinage de ce maximum, l'onde laser est absorbée au sein du matériau dans un volume inférieur au μm^3 , produisant des pressions et des températures très importantes. Par exemple, dans la silice, notre modèle prévoit des températures de l'ordre de 10 eV, une vitesse de montée en température de 10^{18} K/s , des pressions de plusieurs TPa pour une énergie laser déposée de 100 nJ. La séquence des ondes de pression produites dans le matériau est présentée sur la figure 3, à l'instant initial et à trois instants successifs. Nous distinguons clairement la détente qui se forme et repart vers l'extérieur du domaine. L'onde de choc divergente devient très rapidement une onde de choc faible, puis une onde acoustique.

Cette interprétation est validée par l'analyse *post-mortem* des cristaux au microscope électronique [1]. Elle révèle, outre une cavité sub-micrométrique, une zone de cristal amorphe, signature de l'onde de choc divergente. Le diamètre de la zone amorphe correspond à la transition de l'onde de choc en onde acoustique. Nous devons insister ici sur l'absence de dommages en dehors de la cavité formée, lorsque nous nous plaçons dans la zone d'absorption maximale.

Ces nanocavités créées par laser ont de nombreuses applications

Les applications de notre modèle sont nombreuses. Elles vont de la réalisation de cavités calibrées en perspective du stockage d'informations à haute densité, aux problèmes d'ablation chirurgicale de haute précision, en passant par l'étude de l'endommagement d'optiques, polluées ou non par des débris, au voisinage du seuil de claquage.

Références

[1] E. G. GAMALY, S. JUODKAZIS, K. NISHIMURA, H. MISAWA, B. LUTHER-DAVIES, L. HALLO, P. NICOLAÏ, V. T. TIKONCHUK, "Laser-matter interaction in a bulk of a transparent solid: confined micro-explosion and void formation", *Phys. Rev. B*, **73**, p. 214101 (2006).

[2] S. JUODKAZIS, K. NISHIMURA, S. TANAKA, H. MISAWA, E. G. GAMALY, B. LUTHER-DAVIES, L. HALLO, P. NICOLAÏ, V. T. TIKHONCHUK, "Laser induced micro-explosion confined in a bulk of a sapphire crystal: formation of a non-void", *Phys. Rev. Lett.*, **96**, p. 166101 (2006).

[3] L. HALLO, A. BOURGEADE, V. T. TIKHONCHUK, E. G. GAMALY, J. BREIL, soumis à *Phys. Rev. B* (2006).

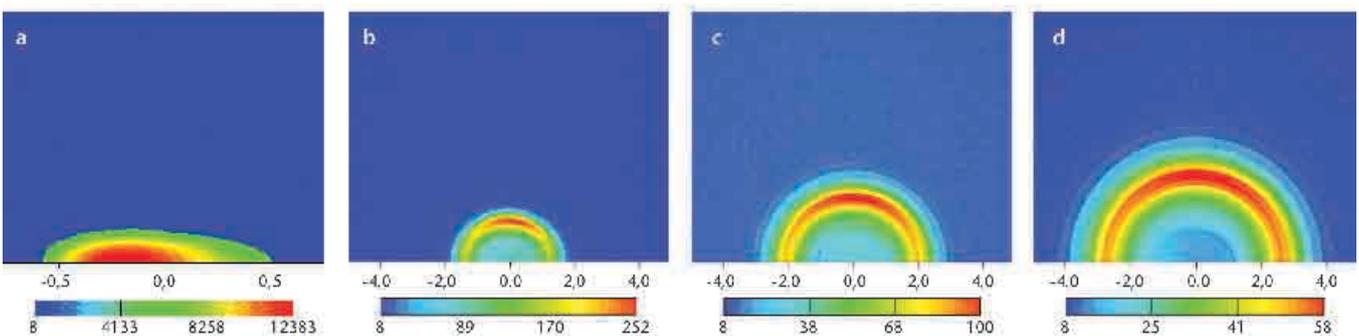


Figure 3
Séquence des ondes de pression produites dans le matériau, à quatre instants successifs.

Les isovaleurs (a) ($t = 0$ ns) représentent le champ de pression dans la silice (en 10^9 dyne/cm²) obtenu par résolution couplée des équations de Maxwell à un modèle d'ionisation, pour une intensité laser de 500 TW/cm². Le champ d'énergie interne résultant est une condition initiale du calcul d'expansion hydrodynamique.

Les isovaleurs (b) ($t = 0,2$ ns) représentent le champ de pression. L'onde de choc divergente est en $r = 1,8$ μ m, la cavité a commencé à se former. Les isovaleurs (c) ($t = 0,4$ ns) montrent que le dépôt d'énergie, qui avait la forme d'un cigare, a produit une onde de choc, et une cavité de forme quasiment sphérique. L'onde de choc divergente, en $r = 3$ μ m, devient une onde acoustique.

Les isovaleurs (d) ($t = 0,6$ ns) montrent que le gradient de pression dans le matériau s'atténue. C'est une phase de stagnation de l'onde d'expansion, qui produit la cavité finale.

DE REMARQUABLES COUCHES MINCES NANOSTRUCTURÉES

P. BELLEVILLE, K. VALLÉ, P. PRENÉ
CEA - Le Ripault

Depuis plusieurs années, le CEA - DAM développe des nanomatériaux hybrides, par synthèse chimique sol-gel pour la mise au point des revêtements optiques des lasers de puissance comme la Ligne d'Intégration Laser (LIL) et le Laser Mégajoule (LMJ) [1].

Récemment, nous avons créé de nouveaux matériaux hybrides dont la porosité, de dimension nanométrique, est organisée. Cette nanostructuration s'obtient par utilisation de molécules qui servent d'empreintes lors de la construction du matériau en solution. Les molécules-empreintes sont ensuite éliminées par voie chimique. La porosité résultante est alors caractérisée par une taille de pores calibrée, voire par une structure cristalline. Ces nanomatériaux d'un nouveau genre sont dits "mésosstructurés". Ce concept a été mis à profit pour développer des nanomatériaux hybrides, inédits et originaux, par croissance in situ de phases nanostructurées hybrides au sein d'un polymère [2]. Leur utilisation comme membrane pour les piles à combustibles basse température est aujourd'hui prometteuse puisqu'elle améliore la conductivité de la membrane par rapport au matériau de référence (Nafion®). Par ailleurs, un autre revêtement mésosstructuré "sol-gel" se révèle être particulièrement adapté pour la détection chimique de gaz nitro-aromatiques. Dans ces deux exemples, la structuration du matériau à l'échelle nanométrique améliore ses propriétés fonctionnelles par rapport à la même composition exempte de porosité organisée. En utilisant la voie d'élaboration sol-gel, nous diminuons les risques associés à l'élaboration et à l'utilisation des nanomatériaux, car le procédé de synthèse se fait en milieu liquide, ce qui permet de répondre à certaines inquiétudes associées aux nanomatériaux.



Un nouveau concept de membranes hybrides conductrices

Dans le cadre des travaux menés sur les Nouvelles Technologies pour l'Énergie au CEA - Le Ripault, nous étudions des voies de synthèse de matériaux qui font appel à des nanomatériaux hybrides. L'objectif est de proposer une alternative au matériau commercial de référence à base de Nafion®. Nous visons une solution à la fois plus économique et plus performante. Ces travaux, à finalité industrielle, s'appuient sur des collaborations fortes entre des unités du CEA (DAM, DSM et DRT), et des laboratoires de l'Université Paris 6 et de l'Université du Maine. Ils ont déjà l'objet de plusieurs dépôts de brevets [3].

Ce nouveau concept a conduit au dépôt plusieurs brevets

Les membranes PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) actuelles, préparées à partir d'ionomères perfluorés, sont performantes ($conductivité > 10^{-2} S.cm^{-1}$) et durables. Elles restent néanmoins trop coûteuses pour le marché automobile, et ne permettent pas un fonctionnement des piles au-delà de 100 °C. En revanche, la croissance, par voie "sol-gel" d'un réseau inorganique au sein d'un polymère en solution fournit un matériau hybride constitué de deux réseaux interpénétrés (*inorganique et organique*) [4], [5]. La phase inorganique générée au sein du polymère améliore la tenue en température de la membrane et assure le maintien de l'hydratation, même dans des conditions sévères de fonctionnement.

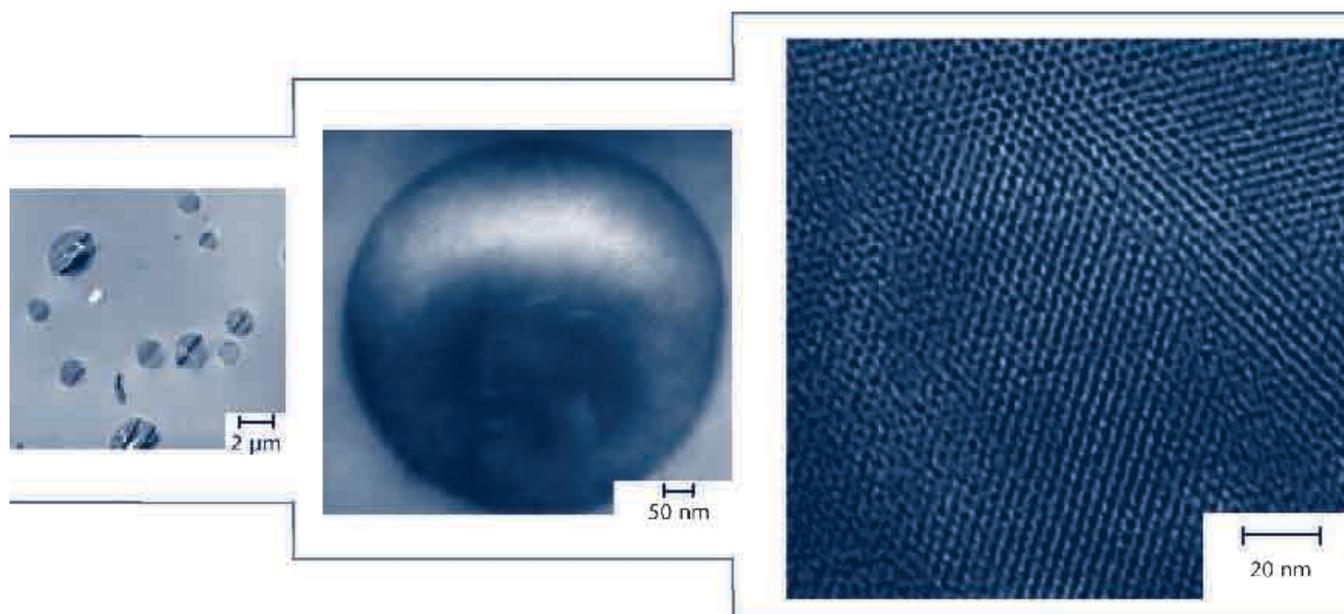


Figure 1
Micrographies détaillées de la nanostructure (mésoporeuse) d'une matrice hybride "sol-gel".

Ces phases hybrides sont synthétisées par polymérisation inorganique au sein d'un milieu liquide contenant le polymère et des molécules tensioactives organisées en micelles dans le solvant. Les réactions "sol-gel" d'hydrolyse et de condensation ont lieu autour des micelles organisées. L'évaporation du solvant conduit à un matériau mésostructuré dont la porosité est la réplique exacte de l'empreinte laissée par les micelles, une fois le tensioactif éliminé par traitement thermique ou solubilisation. La phase poreuse inorganique générée *in situ* présente une grande surface d'échange (jusqu'à 1200 m²/g) intéressante pour les propriétés de conduction ionique. De plus, le fort caractère hydrophile de la phase minérale (silice) confère au matériau une grande capacité à retenir l'eau dans la membrane. La porosité au sein du réseau inorganique est parfaitement calibrée (fonction de la taille de la molécule de tensioactif), et la structure du réseau poreux est organisée (cubique, hexagonale, vermiculaire, etc.) (figure 1).

Il est également possible de fonctionnaliser les pores du réseau inorganique par des groupements conducteurs protoniques afin d'améliorer la conductivité de la membrane, voire de proposer une membrane à base d'un polymère thermostable bon marché sans conductivité intrinsèque. Deux types de polymères sont actuellement considérés pour constituer la phase organique de ces matériaux hybrides : le Nafion[®], polymère conducteur ionique, et le PVDF (polyfluorure de vinylidène) polymère non conducteur. Les résultats obtenus jusqu'ici démontrent la faisabilité de croissance de silice méso-organisée au sein d'une matrice polymérique (Nafion[®] ou PVDF),

et l'obtention d'une membrane flexible, transparente et homogène à l'échelle nanométrique (figure 2). Les valeurs de conductivité sont prometteuses et supérieures à celles du Nafion[®] seul, y compris en conditions de faible hygrométrie.

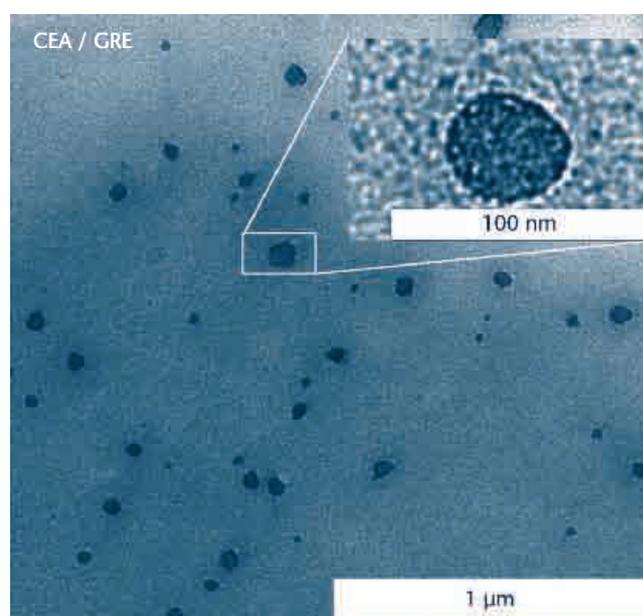


Figure 2
Micrographie d'une membrane hybride mésostructurée dans un polymère conducteur protonique.

Couche active nanostructurée pour la détection de molécules explosives

Avec le risque croissant de l'utilisation d'explosifs à base de nitro-aromatiques, le développement de capteurs efficaces, portables, et à bas coût est devenu une priorité. À ce titre, la silice est un matériau prometteur. Grâce à une nano-structuration du matériau, des couches de silice mésoporeuse préparée par voie "sol-gel" ont démontré des propriétés remarquables pour la détection gazeuse (figure 3).

Ce principe de détection chimique repose sur l'interaction, à l'interface solide-gaz, entre la surface du capteur et la molécule-cible. C'est pourquoi l'utilisation de silice à grande surface spécifique (plusieurs centaines de m^2/g) améliore d'autant la sensibilité du capteur. De plus, les propriétés de surface des nanoparticules de silice peuvent être facilement adaptées par une fonctionnalisation chimique adéquate de cette surface. Toutes ces possibilités accroissent les performances de la couche active du capteur comme la sensibilité, la sélectivité, et la réversibilité. Ainsi, une silice rendue hydrophobe par méthylation démontre une grande efficacité de détection (sensibilité de 0,1 ppm) quelles que soient les conditions d'hygrométrie ambiante (de 0 % à 80 % en humidité relative).

Selon le même principe, un film à base de silice fluorescente nanostructurée a été développé. Sa caractérisation révèle une grande sensibilité (0,1 ppm), une forte réversibilité (80 %), et une excellente robustesse vis-à-vis de molécules interférentes comme des molécules organiques volatiles (acétone, éthanol, benzène, toluène, etc.). Aujourd'hui, l'évaluation de la durée de vie de ce type de capteurs en ambiance réelle est en cours mais nous pouvons d'ores et déjà dire qu'elle est prometteuse.

Références

- [1] P. BELLEVILLE et al. "Use of sol-gel hybrids for laser optical thin films", *Mat. Res. Soc. Symp.*, **726**, p. 369-380 (2002).
- [2] K. VALLÉ, P. BELLEVILLE, F. PEREIRA, C. SANCHEZ, "Hierarchically structured transparent hybrid membranes by in situ growth of mesostructured organosilica in host polymer", *Nature Materials*, **5**, n°2, p. 107-111 (2006).
- [3] Brevets CEA WO 04/067640 (antériorité : FR 03/00726), WO 04/067611 (antériorité : FR 03/00724), FR 04/03939.
- [4] P. BELLEVILLE, K. VALLÉ, "Du nano-objet au macro-composant : les nanomatériaux sol-gel pour l'optique", *Clefs CEA*, n° 52, p. 78 (2005).
- [5] C. SANCHEZ, B. JULIAN, P. BELLEVILLE, M. POPALL, "Applications of hybrid organic-inorganic nanocomposites", *J. Mater. Chem.*, **15**, p. 3559-3592 (2005).

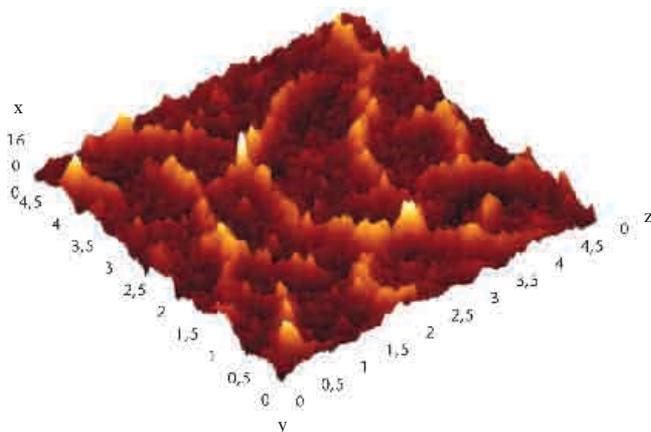


Figure 3
Revêtement "sol-gel" nanostructuré ($5 \mu m$ en x , $5 \mu m$ en y , $10 nm$ en z) vu au microscope à force atomique.

ÉVÈNEMENTS PARASITES DANS DES CIRCUITS SOUS IRRADIATION

V. FERLET-CAVROIS, P. PAILLET, J. BAGGIO
CEA - DAM - Île-de-France

L'interaction de particules radiatives avec les composants à semi-conducteur génère localement des charges parasites, soit par interaction directe avec le cortège électronique dans le cas des ions lourds, soit par l'intermédiaire d'interactions nucléaires typiquement induites par des neutrons ou des protons. Les charges parasites générées dans le semi-conducteur sont ensuite collectées par les zones de champ des transistors élémentaires, et peuvent se traduire par des perturbations électriques dans les circuits. Typiquement, ces charges sont susceptibles d'induire des changements d'état logiques dans les cellules mémoires, ou des signaux parasites qui se propagent le long des chaînes de portes et des arbres d'horloge.

La mesure et l'analyse de ces charges parasites permettent de quantifier le nombre de signaux transitoires capables d'induire des erreurs, et de remettre en cause la fiabilité d'un circuit. En particulier, la connaissance de la quantité de charge collectée et de la durée des transitoires parasites permet de mettre en place des techniques de durcissement adaptées, avec un impact minimal sur les performances du circuit.

Au cours des années 2005 et 2006, les électroniciens du CEA - DAM - Île-de-France ont mis au point de nouvelles techniques de mesure de ces signaux transitoires, optimisées pour détecter des signaux transitoires très courts [1], [2]. De nombreuses mesures ont été réalisées avec des rayonnements de type ions lourds, protons, laser pulsé, sur plusieurs technologies représentatives des filières industrielles actuelles et futures. Ces mesures constituent une source d'information importante sur la tenue de l'électronique en environnement radiatif.



La fiabilité des composants électroniques en environnement radiatif est l'un des obstacles majeurs à l'utilisation de technologies fortement intégrées et performantes dans les systèmes militaires ou spatiaux. C'est également un obstacle à la miniaturisation des technologies pour l'électronique et l'informatique au sol, soumises à l'environnement radiatif naturel terrestre. Le blindage des systèmes électroniques contre les particules n'est pas envisageable dans la plupart des cas, en particulier pour les systèmes embarqués ou "grand public". Il est donc nécessaire de quantifier la sensibilité des technologies, pour mettre en place des moyens de durcissement au niveau des circuits et des systèmes. Les électroniciens du CEA - DAM - Île-de-France ont mis en œuvre de nouvelles méthodes de mesure des signaux transitoires rapides générés par les composants électroniques [1], [2]. Plusieurs types de transistors ont été étudiés, fabriqués avec des technologies standards sur silicium massif (*bulk*), ou avec des technologies silicium sur isolant (*SOI* : *Silicon On Insulator*). Différentes générations ont également été explorées, de 0,25 μm à 50 nm.

Les technologies 0,25 μm ont été produites à partir de 1997 (c'est l'époque des microprocesseurs *Pentium*), tandis que la génération 50 nm ne verra le jour en production qu'à partir de 2009 – 2010.

Pour caractériser la sensibilité des technologies, nous avons mesuré la distribution statistique des événements transitoires parasites sur des transistors élémentaires irradiés avec un laser pulsé, avec des ions lourds, ou avec des protons. Dans cet article, nous montrons quelques exemples de ces mesures, en soulignant les avancées techniques sur les composants les plus intégrés. Ces mesures sont ensuite analysées en termes de sensibilité à la propagation de signaux parasites dans des chaînes de portes. En particulier, des techniques de simulation sont mises au point, et utilisées pour prédire le besoin en durcissement des systèmes futurs. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration avec les industriels du semi-conducteur, le pôle Minatec et nos collègues américains de *Sandia National Laboratories* et du *Naval Research Laboratory*.

Mesure de signaux parasites très courts

Pour étudier la sensibilité de ces technologies aux particules des environnements radiatifs spatial et terrestre, deux types d'expérimentations existent :

- exposer les composants directement devant un faisceau d'ions, de protons, ou de neutrons. Dans ce cas, chaque interaction particule-composant est unique, et la réponse électrique du composant doit être mesurée en une seule fois.
- simuler le passage de ces particules par un faisceau laser intense, focalisé sur le composant, et dont les caractéristiques sont choisies pour reproduire l'ionisation induite par les particules. L'avantage de cette technique réside dans la possibilité de répéter l'interaction laser-composant exactement au même endroit du composant, avec une récurrence de l'ordre de 20 000 fois par seconde. Cela permet de mesurer beaucoup plus précisément la réponse impulsionnelle du composant par des techniques d'échantillonnage. Le faisceau laser irradie par impulsions très courtes (*picoseconde*), et la réponse transitoire du composant est reconstituée par l'oscilloscope avec une grande précision, grâce à la récurrence et à la stabilité de la position du faisceau laser sur le transistor.

La figure 1 montre deux exemples de courants transitoires mesurés sur des transistors SOI très avancés (50 nm de longueur de grille) fabriqués par le CEA - LETI [3]. Elle met en évidence l'influence de l'architecture du transistor (*structure plane ou 3D*) sur la forme du transitoire. Le transistor SOI à structure plane a une réponse très rapide (*moins de 25 ps à mi-hauteur et 45 ps à la base*), tandis que le transistor 3D a une réponse plus lente (*proche de 70 ps à mi-hauteur*) avec une trainée de courant caractéristique d'un effet mémoire du transistor vis-à-vis des charges parasites. Il est préférable d'utiliser la technologie pour laquelle les transitoires générés sont les plus courts.

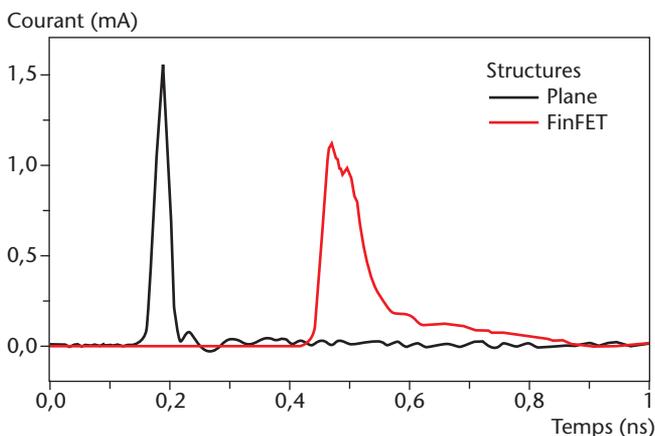


Figure 1 Exemples de mesures de courant transitoire sur des transistors avancés SOI (*silicium sur isolant*) du CEA - LETI, de longueur de grille 50 nm. Deux types de transistors sont mesurés ici : transistor simple grille à structure plane et film de silicium très mince (11 nm), et transistor triple-grille (*appelé FinFET*).

Malgré les avantages des irradiations lasers, nous devons réaliser des irradiations sous faisceau d'ions lourds et de protons pour se rapprocher des conditions réelles d'utilisation en environnements radiatifs. Contrairement aux mesures avec un laser pulsé, il est impossible de garantir la position des impacts des particules sur le composant. Les signaux parasites doivent être plus longs et d'amplitude plus forte pour être détectés. Ainsi, jusqu'à présent, seuls des transistors standards sur substrat massif (*bulk*) avaient été caractérisés. En améliorant nettement le dispositif expérimental, nous avons détecté, pour la première fois, les transitoires rapides et de faible amplitude générés par des transistors SOI.

Pour analyser l'effet de l'intégration des technologies, nous avons mesuré la réponse "pire-cas" des transistors SOI de génération 0,25 μm , 130 nm, et 70 nm, irradiés par des ions lourds au GANIL. Sur la figure 2, nous voyons nettement la diminution de l'amplitude et de la durée des transitoires avec l'intégration technologique. La charge parasite collectée, visualisée par l'aire des courants transitoires, diminue donc avec l'intégration technologique. Cet effet est caractéristique de la réduction du volume sensible des transistors SOI (*fabriqués sur isolant*) avec la diminution des dimensions des transistors élémentaires. C'est un élément favorable pour le durcissement des circuits futurs, typique des technologies SOI.

Analyse de la propagation des signaux

Des simulations doivent être entreprises pour évaluer comment un courant transitoire, généré à l'origine dans un transistor, se propage en signal parasite lorsqu'il est intégré dans une chaîne de portes (*inverseurs, par exemple*). La largeur du transitoire de tension qui se propage est déterminante, car elle conditionne le besoin de durcissement et notamment la valeur des éléments de filtrage.

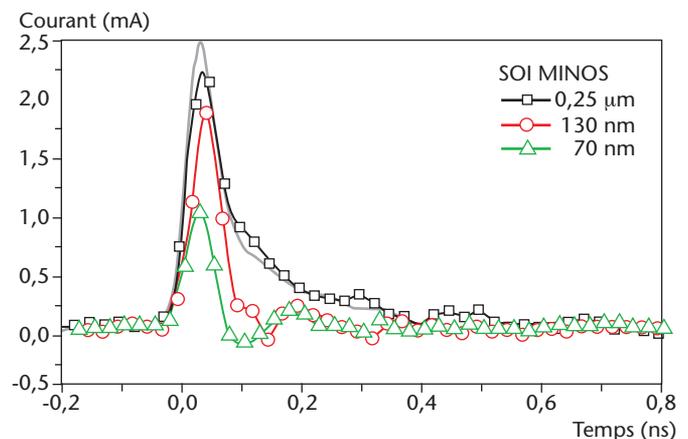


Figure 2 Mesures de courant transitoire sur des technologies SOI (*silicium sur isolant*) actuelles, comparables à des technologies industrielles. Le transistor 70 nm a été fabriqué au CEA - LETI. Les transistors sont irradiés aux ions lourds au GANIL, à Caen. Pour le transistor 0,25 μm , la réponse aux ions lourds est comparée à une mesure laser.

Cette démarche a été utilisée sur plusieurs générations technologiques à partir des caractéristiques mesurées sur transistors seuls. Nous avons mis en évidence un point important : la charge collectée minimale, par conséquent la largeur des transitoires qui se propagent (figure 3), diminue avec l'évolution des technologies. Les technologies très intégrées sont plus sensibles aux faibles charges, avec une réponse plus rapide, que les technologies anciennes. C'est un effet corollaire de la réduction de la géométrie des transistors et de la tension d'alimentation. En fonctionnement usuel (*hors irradiation*), la charge contrôlée par chaque transistor est d'environ 1 000 électrons pour la génération 70 nm, alors qu'elle était dix fois plus importante (*plus de 10 000 électrons*) en technologie 0,25 µm. Il est donc naturel que les transistors 70 nm soient plus sensibles aux faibles charges parasites, et avec une réponse transitoire plus rapide, que leurs ancêtres fabriqués en 0,25 µm.

Les résultats de nos travaux sont reportés en figure 3, et comparés à des simulations antérieures pour les deux structures *SOI* et *bulk*. Nous retrouvons globalement une tendance vers la réduction de la largeur des transitoires, avec quelques nuances suivant l'architecture des technologies. Notre apport dans cette analyse a été de valider les résultats de simulations par des mesures directes de sensibilité, sur des technologies représentatives des filières industrielles. Cela a permis de raffiner les prédictions faites par simulation, en particulier en tempérant l'optimisme des études précédemment publiées, qui utilisaient des modèles trop simplifiés.

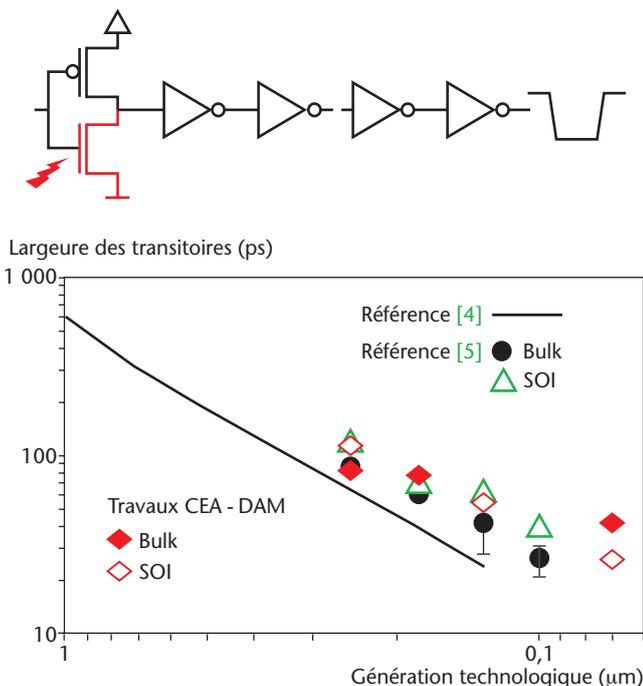


Figure 3 Largeur minimum des signaux transitoires pour une propagation non atténuée dans une chaîne de portes logiques, en fonction de la génération technologique. Les travaux du CEA - DAM - Île-de-France sont comparés aux travaux antérieurs [4], [5], pour les technologies standards (*bulk*) et *SOI* (*silicium sur isolant*).

Jusqu'aux dernières générations de technologies commerciales, les problèmes de durcissement concernaient principalement les applications spatiales ou avioniques. Désormais, les nouvelles technologies deviennent sensibles aux particules alpha et aux neutrons atmosphériques caractéristiques de l'environnement terrestre. Ce fait est perçu dans l'industrie comme la première menace sur la fiabilité des futurs systèmes pour des applications grand-public au niveau du sol !

Les travaux du CEA - DAM - Île-de-France sont particulièrement bien positionnés. Ils permettent de quantifier les besoins de durcissement, et de déterminer pour chacun d'eux les architectures technologiques les plus favorables.

Références

[1] V. FERLET-CAVROIS, P. PAILLET, D. McMORROW, A. TORRES, M. GAILLARDIN, J. S. MELINGER, A. R. KNUDSON, A. B. CAMPBELL, J. R. SCHWANK, G. VIZKELETHY, M. R. SHANEYFELT, K. HIROSE, O. FAYNOT, C. JAHAN, L. TOSTI, "Direct Measurement of Transient Pulses Induced by Laser and Heavy Ion Irradiation in Deca-nanometer Devices", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **52**, n°6, p. 2104 (2005).

[2] V. FERLET-CAVROIS, P. PAILLET, M. GAILLARDIN, D. LAMBERT, J. BAGGIO, J. R. SCHWANK, G. VIZKELETHY, M. R. SHANEYFELT, K. HIROSE, E. W. BLACKMORE, O. FAYNOT, C. JAHAN, L. TOSTI, "Statistical Analysis of the Charge Collected in SOI and Bulk Devices under Heavy Ion and Proton Irradiation - Implications for Digital SETs", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **53**, n°6, p. 3242 (2006).

[3] O. FAYNOT, A. VANDOOREN, R. RITZENTHALER, T. POIROUX, J. LOLIVIER, C. JAHAN, S. BARRAND, T. ERNST, F. ANDRIEU, M. CASSE, B. GIFFARD, S. DELEONIBUS, "Advanced SOI MOSFETs: Structures and Device Physics", *Proceedings - Electrochemical Society*, p. 1 (2005).

[4] D. G. MAVIS, P. H. EATON, "Soft Error Rate Mitigation Techniques for Modern Microcircuits", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **49**, n°6, p. 216 (2002).

[5] P. E. DODD, M. R. SHANEYFELT, J. A. FELIX, J. R. SCHWANK, "Production and Propagation of Single-Event Transients in High-Speed Digital Logic ICs", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **51**, n°6, p. 3278 (2004).

CALCULS D'INFRASONS SUR TERA 10

B. DESPRÉS, H. JOURDREN, P.-F. PISERCHIA, O. GAINVILLE
CEA - DAM - Île-de-France

Dans toute discipline technique, il est important de savoir quand un seuil inatteignable auparavant est atteint, et même dépassé. C'est ce qui vient de se passer dans le courant de l'année 2006 pour les calculs tridimensionnels directs d'infrasons dans l'atmosphère terrestre à l'aide du supercalculateur TERA 10. Les infrasons sont des ondes acoustiques de fréquence faible susceptibles de se propager sur de très longues distances dans l'atmosphère terrestre. La mesure physique des infrasons, puis leur analyse et leur calcul, contribue aux moyens de surveillance internationaux.



Qu'est ce qu'un infrason ?

Les ondes infrasonores, ou infrasons, sont des ondes acoustiques qui se propagent par réflexions multiples sur les différentes couches de l'atmosphère et sur le sol. Leur fréquence inférieure à 20 Hz se situe en dessous du domaine audible (*d'où leur nom*). Leur vitesse au sol, de l'ordre de 330 m/s, peut être modulée par le vent et la température en altitude. Les infrasons sont d'origine naturelle ou artificielle. Certaines sources infrasonores sont suffisamment puissantes pour secouer l'atmosphère en faisant plusieurs fois le tour de la Terre. Les stations infrasons du TICE (*Traité d'Interdiction Complète des Essais*) ont pour mission de surveiller les signaux acoustiques dans l'atmosphère pour détecter les éventuels contrevenants à ce traité. Cela explique l'intérêt majeur de tester régulièrement ces stations infrasons avec des sources dont la position est connue avec précision.

Nous pouvons distinguer deux origines d'infrasons :

- ceux issus des phénomènes naturels qui agitent l'atmosphère (*orages*) et le globe terrestre. Par exemple, les météorites qui se désintègrent dans notre atmosphère, les séismes qui ébranlent le sol, génèrent des infrasons ;
- ceux d'origine humaine, créés par les explosions (*accidents, tirs de carrière, essais*).

Comment calculer les infrasons ?

Le calcul numérique des infrasons repose sur la discrétisation d'un système d'équations aux dérivées partielles décrivant le phénomène physique. La difficulté principale provient de la longueur caractéristique du phénomène physique. En effet, il est nécessaire d'échantillonner suffisamment, au moins 10 points de discrétisation par longueur d'onde, pour un calcul direct usuel (*application particulière de la règle de Shannon*). Pour des domaines tridimensionnels de plusieurs centaines de longueurs d'onde par dimension d'espace, comme c'est le cas pour l'atmosphère, cela conduit rapidement à un milliard de mailles.

Des méthodes alternatives existent. Elles consistent en une approximation raisonnable des équations, pour contourner cette règle d'échantillonnage et réduire la charge de calcul. C'est le cas des méthodes de rayons de type *Hamilton-Jacobi*, ou des méthodes paraboliques que les géophysiciens du CEA - DAM exploitent. Cela se fait au prix d'une approximation supplémentaire, bien maîtrisée, grâce à des comparaisons avec des méthodes avancées, comme la résolution directe des équations d'*Euler* linéarisées. Avec la résolution directe, la charge de calcul peut devenir gigantesque, à cause de la règle d'échantillonnage du signal, entraînant une grande difficulté de mise en œuvre. C'est là qu'intervient l'utilité des calculateurs massivement parallèles tels que le calculateur TERA 10. La place mémoire disponible rend possible une discrétisation suffisamment fine de l'atmosphère. Le nombre de processeurs diminue le temps de restitution du calcul, à condition que ceux-ci soient bien utilisés en parallèle.

Description du calcul sur TERA 10

Nous commençons par décrire les conditions générales de calcul. Dès la mise en service de la machine TERA 10, des simulations "en vraie grandeur" ont été lancées pour évaluer la stabilité matérielle et logicielle de la configuration. Il s'agissait d'une période privilégiée pour les équipes de développement, qui leur a permis de vérifier le niveau de portabilité des codes, le bien fondé des dernières évolutions de leurs architectures, tout en engrangeant des premières simulations d'exception.

Avec 5 000 processeurs double-cœur et plusieurs mégawatts de consommation électrique, la machine TERA 10 est à ce jour la deuxième plus puissante en Europe. TERA 10 offre, avec 8 processeurs double-cœur par nœud, (au lieu de 4 processeurs simple-cœur sur TERA 1) une bouffée d'oxygène appréciable pour les codes vectoriels, un facteur 4 sur le nombre maximal de processeurs par calcul, et un facteur 12 sur la mémoire. Ce choix se traduit par une évolution aux conséquences parfois subtiles pour la gestion mémoire, le passage d'une configuration de type grappe de nœuds SMP (TERA 1) à une configuration grappe de nœuds NUMA (TERA 10). Les gains en puissance apportés par le nouveau processeur Itanium (au lieu du processeur Alpha sur TERA 1) sont impressionnants. Un premier très gros calcul mené sur TERA 10 en février 2006 a permis d'en apprécier les enjeux. Le calcul a été effectué avec la plate-forme C++ *Dragst-R* sur plusieurs briques technologiques "calcul haute performance", notamment :

- le mode de rangement mémoire du *benchmark* de recette TERA-TF permettant une utilisation quasi-optimale par directions alternées de la mémoire cache de chaque processeur ;
- la souche récente [1] de schémas numériques d'ordre très élevé pour l'équation des ondes et l'advection, mise au point pour tirer le maximum du processeur Itanium, soit un très grand nombre d'opérations "utiles" pour peu de requêtes mémoire,
- la bibliothèque MPC d'échanges de messages MPI/multithread ;
- la bibliothèque *Hercule* de traitement de très gros volumes de données.

Ce calcul a reçu le label *Grands Challenges*, qui distingue les réalisations remarquables en "calcul parallèle haute performance"

Le calcul principal est une simulation *Euler* 3D de l'expérience *Misty Picture* (explosion de 4 685 tonnes de nitrate d'ammonium et d'essence, le 14 mai 1987, au Nouveau Mexique - USA, à la surface du sol). Le domaine de simulation 3D couvre 4 millions de km² au sol (2 000 x 2 000 km²) et s'étend jusqu'à 200 km d'altitude. Les résultats de la simulation sont résumés sur la figure 1.

Plusieurs coupes du domaine de calcul sont données sur la figure 2. Un schéma d'ordre 17 a été utilisé pour résoudre l'équation des ondes avec vents, ce qui, pour un signal de 0,1 Hz et 8 mailles par longueur d'onde, conduit à une résolution spatiale de 400 mètres au sol, et un total de 10 milliards de mailles.

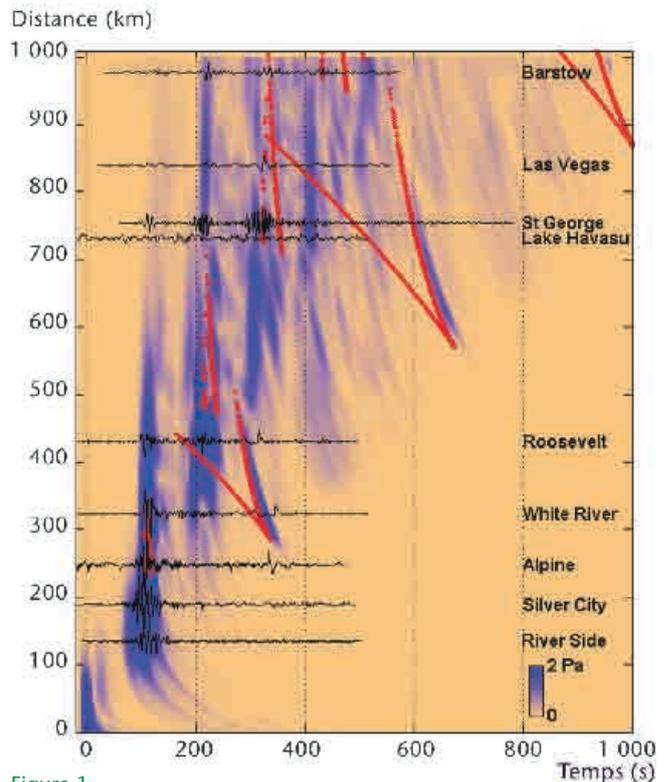


Figure 1

L'énergie de signaux synthétiques (en bleu) est superposée aux mesures (en noir) pour des stations situées à différentes distances de la source. Cette représentation permet d'identifier le trajet des ondes dans l'atmosphère, et d'estimer la pertinence des calculs. Les lignes rouges donnent les temps d'arrivée issus du tracé des rayons.

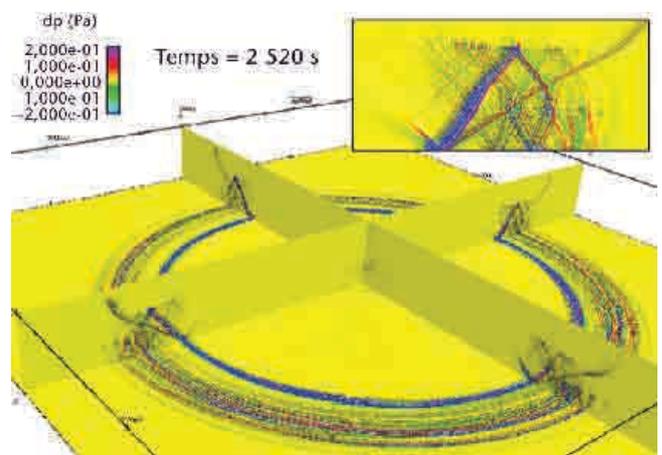


Figure 2

Calcul *Dragstser*.

Sur cette figure, les isolignes de pression sont représentées sur deux plans verticaux et sur un plan horizontal. Les plans se coupent à angle droit. Nous observons que l'onde de pression (infrasons) créée au centre s'est propagée en se réfléchissant à mi-hauteur (vers 100 km d'altitude). Un agrandissement illustre la structure riche de l'onde de pression au sol. Le vent en altitude explique la légère dissymétrie du champ de pression.

Une fraction de la machine TERA 10 a suffi pour mener le calcul jusqu'au temps d'arrivée du signal infrasonore sur les sondes les plus éloignées (3 500 secondes), soit exactement 384 processeurs durant 2 jours et demi, pour une puissance soutenue constatée de 0,85 téraflops, et 2,2 gigaflops par processeur. La même simulation menée durant 10 heures sur 1 936 processeurs a conduit à 5,8 téraflops. Ce chiffre est d'excellent augure pour la configuration complète TERA 10, qui devrait permettre, sur ce type d'application, une puissance soutenue de 20 téraflops.

Conclusions et perspectives

D'une part, les études d'extensibilité ont montré que nous possédons à présent une excellente maîtrise des méthodes de programmation parallèle sur TERA 10, pour des problèmes qui se prêtent favorablement à un traitement parallèle.

D'autre part, les avancées importantes en calcul d'infrasons, qui ont donné lieu à une publication [2] en cours d'évaluation, ainsi qu'à des communications dans des conférences internationales [3], permettent d'ores et déjà d'asseoir la confiance que nous avons dans nos outils de calculs des infrasons.

Références

- [1] S. DEL PINO, H. JOURDREN, "Arbitrary high-order schemes for the linear advection and wave equations: application to hydrodynamics and aeroacoustics", *C. R. Acad. Sci. Paris, Série I* 342(6), p. 441-446 (2006).
- [2] B. DESPRÉS, S. DELPINO, H. JOURDREN, P. HAVÉ, P.-F. PISERCHIA, "3D Finite Volume Simulation of Acoustic Waves in the atmosphere", soumis à *Computer and Fluids*.
- [3] O. GAINVILLE, P.-F. PISERCHIA, P. BLANC-BENON, J. SCOTT, *AIAA n°2006-2451* (2006).

TERA 10

Le supercalculateur TERA 10, un nouvel outil pour la recherche

Conçu, fabriqué et installé par la société Bull, TERA 10 (figure) est un supercalculateur parallèle, c'est-à-dire capable de faire travailler simultanément, sur une même simulation, un grand nombre de processeurs. Il comprend 5 000 processeurs double-cœur Intel de type "Montecito", qui fournissent chacun une puissance de calcul de 12,8 millions d'opérations par seconde.

L'élément de base de TERA 10 est le "nœud" de calcul qui regroupe 8 processeurs double-cœur. Il s'agit d'un serveur Bull Novascale. Les serveurs sont regroupés par 3 dans des armoires : TERA 10 comprend 200 armoires de calcul reliées par 45 commutateurs fournis par la société Quadrics. Ces commutateurs rendent possible la distribution d'une simulation sur tous les processeurs de la machine, ce qui permet donc de disposer, pour une seule simulation, d'une capacité de calcul de plus de 50 000 milliards d'opérations par seconde. Les résultats sont stockés sur 10 000 disques. TERA 10 occupe une surface de 600 m² et consomme environ 1,8 MW.



Plusieurs premières mondiales sont réalisées par cette machine :

- c'est un supercalculateur utilisant *Linux* comme système d'exploitation, marquant l'engagement du CEA et de Bull pour les systèmes "ouverts",
- avec 1 petaoctet (1 million de milliards d'octets) de données directement accessibles, soit 30 fois l'équivalent des informations contenues dans la Bibliothèque Nationale de France, c'est aussi la machine la plus performante pour la gestion des données,
- cette machine, basée sur des "composants sur étagère", est la première à utiliser le dernier né des processeurs *Itanium* d'*Intel*, le "Montecito" double-cœur constitué de 1,7 milliard de transistors.

SUMATRA, DEUX ANS APRÈS

J. GUILBERT, H. HÉBERT
CEA - DAM - Île-de-France

Le 26 décembre 2004 s'est produit à Sumatra (Indonésie) l'un des plus forts séismes jamais enregistrés, de magnitude 9,2. Il fut suivi d'un tsunami catastrophique qui a affecté l'ensemble de l'Océan Indien. La quantité et la variété des mesures des deux événements, séisme et tsunami, ont apporté un éclairage sur les mécanismes mis en jeu lors de ruptures sismiques majeures et sur la génération des tsunamis qui en résultent.

D'un point de vue tectonique, le séisme du 26 décembre 2004 a rompu, sur plus de 1 000 km, la zone de confrontation des plaques australienne et eurasiatique, comme le montrent les inversions des données géophysiques. En termes d'énergie libérée, ce séisme représente à lui seul l'équivalent de plus d'une année de sismicité mondiale cumulée. Apprendre à caractériser rapidement, en cas d'alerte, l'ampleur de tels événements, afin de localiser les zones fortement touchées par le séisme, ainsi que le potentiel "tsunamigénique", représente un défi important pour les sciences de la Terre.

C'est la première fois qu'un tsunami de cette ampleur a été enregistré par des instruments très divers, répartis sur l'ensemble des océans, depuis les marégraphes installés dans les ports, jusqu'aux satellites altimétriques, sans oublier les stations sismiques et hydroacoustiques de l'Océan Indien. Les enregistrements marégraphiques ont été peu nombreux et ne permettent pas toujours de discuter des caractéristiques du tsunami. En revanche, les données altimétriques révèlent en détail un tsunami exceptionnel au large, enregistré deux heures après le séisme. L'inversion de ces données a fourni une distribution des glissements pour le séisme à l'origine des vagues, soulignant les glissements supérieurs à 15 m sur presque la moitié de la faille. Les simulations en champ lointain, à La Réunion, ont permis de tester les méthodes de simulation qui sont appliquées pour l'évaluation de l'aléa tsunami, notamment en Polynésie française.

L'exploitation et la modélisation de l'ensemble des données recueillies seront à la base des futurs systèmes d'alerte aux tsunamis qui se mettent en place depuis cet événement majeur de 2004.

Un séisme majeur

Le séisme de Sumatra est le premier de magnitude supérieure à 9 bénéficiant de nombreux enregistrements numériques dans différentes technologies (*sismologie, GPS, marégraphique, et satellitaire*). Cependant, la grande difficulté rencontrée dans les minutes qui ont suivi l'initialisation de la rupture a été d'interpréter l'ensemble des informations en termes de longueur et de vitesse de rupture, et de déplacements relatifs le long de la faille. Ces informations sont essentielles pour appréhender facilement l'ampleur d'un tel séisme, contrairement à la magnitude qui intègre tous les paramètres physiques de la rupture en une seule valeur.

Pour pallier cette difficulté, nous avons analysé la rupture grâce aux antennes de capteurs installées dans le cadre du Traité d'Interdiction Complète des Essais. Une antenne est un réseau dense de capteurs qui permet de déterminer l'azimut et la vitesse de passage des ondes qui le traversent. Nous avons appliqué ce traitement pour des antennes hydroacoustique (*H08S*) et sismologique (*CMAR*) (*figure 1*). L'inversion de ces données permet d'obtenir de façon robuste la longueur (1 235 km) et la durée (8 min 35 sec) de la rupture (*figure 2a*). Ces informations indiquent que la totalité de la rupture est sous-marine, avec une vitesse de rupture de 2,4 km.s⁻¹.

Une mesure exceptionnelle des vagues du tsunami

En plein océan, l'amplitude d'un tsunami notable excède rarement 10 cm. Le 26 décembre 2004, lors de leur survol de l'Océan Indien, deux heures après le séisme, plusieurs satellites ont mesuré des amplitudes atteignant jusqu'à 120 cm, crête à creux, pour le satellite *Jason*, soulignant le caractère exceptionnel de ce tsunami. Ces données satellitaires ont été inversées pour décrire le séisme à l'origine du tsunami. Le tsunami au large est un phénomène linéaire qui est simplement la somme

pondérée de contributions de sous-failles, chacune caractérisée par un glissement. Chaque contribution est calculée par la méthode de simulation des tsunamis développée au CEA - DAM - Île-de-France. Le modèle obtenu (*figure 2b*) montre des concentrations de glissement supérieures à 10 m au large de *Sumatra* (localement jusqu'à 30 m). Sous les îles *Andaman*, cette inversion, comme l'analyse d'antenne, montre un glissement important inaccessible aux inversions classiques en sismologie.

Caractéristiques en champ lointain : exemple de La Réunion

À *La Réunion*, atteinte 7 heures après le séisme, des dommages modérés ont été constatés sur quelques infrastructures portuaires. Les modélisations soulignent la nécessité de considérer des glissements réalistes sur la faille. Un glissement homogène moyen ne permet pas de reproduire le niveau d'eau observé dans le port de *La Pointe des Galets*, alors que des glissements hétérogènes, plus forts au large d'*Aceh*, ajustent mieux ces observations. De tels modèles expliquent également mieux les variations d'impact sur les différentes côtes de l'Océan Indien : le modèle hétérogène concentre plus d'énergie vers le *Sri Lanka*, les *Maldives*, et la *Thaïlande*, conformément aux observations [3].

Conclusions et perspectives

Les données recueillies le 26 décembre 2004 ont permis de tester des méthodes originales pour caractériser le séisme et le tsunami. Les études de la source montrent qu'il est possible d'obtenir la géométrie et la cinématique de la source, sur des données accessibles quelques dizaines de minutes après l'initialisation de la rupture. Les résultats obtenus sont fondamentaux pour la compréhension de la physique de la rupture, et pour la mise en œuvre des futures structures d'alerte aux tsunamis pour les Océans Indien, Atlantique et pour la Mer Méditerranée.

Références

[1] J. GUILBERT, J. VERGOZ, E. SCHISSELÉ, A. ROUEFF, Y. CANSI, "Use of hydroacoustic and seismic arrays to observe rupture propagation and source extent of the Mw=9,0 Sumatra earthquake", *Geophys. Res. Lett.*, 32, p.15 (2005).
 [2] A. SLADEN., H. HÉBERT, "On the use of satellite altimetry to infer the rupture kinematic of the 2004 Sumatra earthquake", soumis à *Geophys. J. Int.*
 [3] H. HÉBERT, A. SLADEN, F. SCHINDELÉ, "Numerical modeling of the great 2004 Indian Ocean tsunami: focus on the Mascarene Islands", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 97, p. S208 (2007).

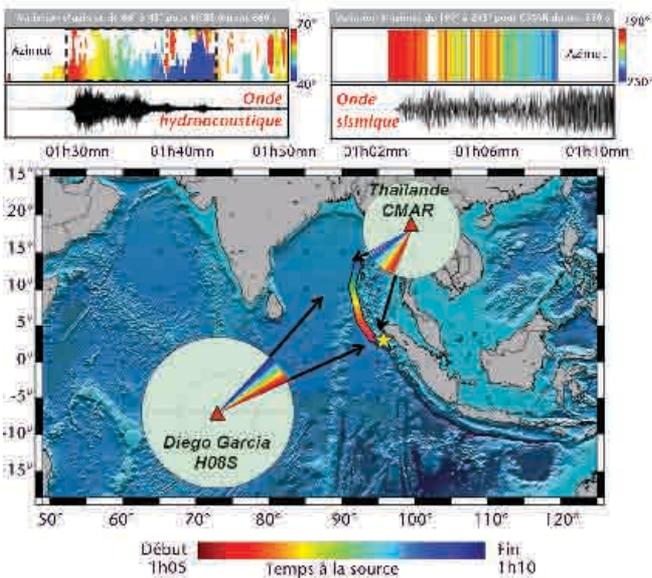


Figure 1 Exemples de traitement d'antenne pour une station hydroacoustique (*Diego Garcia*) et une station sismologique (*Chang Mai*). Pour ces deux stations, nous observons clairement une variation d'azimut avec le temps traduisant une propagation du sud vers le nord, sur plus de 1 200 km, de la rupture [1].

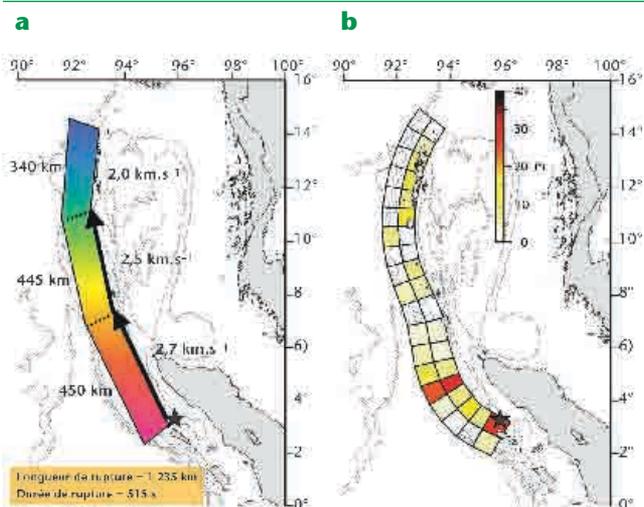


Figure 2 a) L'analyse en traitement d'antenne fournit la géométrie ainsi que la cinématique de la rupture [1]. b) Glissements obtenus sur chaque sous-faille, par inversion des données altimétriques [2].

LIVRES PARUS EN 2005 ET 2006

L'intérieur de la Terre et des planètes

Agnès DEWAELE (CEA - DAM - Île-de-France),
 Chrystèle SANLOUP
 Éditions Belin, septembre 2005



Comment les géologues et les physiciens sondent-ils les profondeurs de la Terre et des planètes ? Comment modélisent-ils ces objets ? Afin de répondre à ces questions, ce livre décrit les outils pour reproduire, au laboratoire, les conditions extrêmes de pression et de température de l'intérieur de la Terre et des planètes, synthétise les connaissances sur le manteau et le noyau de la Terre, et sur la structure des planètes géantes et de leurs satellites.

The Lanczos and conjugate gradient algorithms, from theory to finite precision computations

Gérard MEURANT (CEA - DAM - Île-de-France)
 Publication SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics), 2006



L'ouvrage est consacré aux algorithmes de Lanczos et du "gradient conjugué", pour le calcul de valeurs propres et la résolution de systèmes linéaires. Sont exposés l'état de l'art, et de nouveaux résultats mathématiques sur la convergence, en particulier pour utiliser ces méthodes sur des calculateurs en arithmétique flottante. Bien que ces algorithmes ne vérifient pas leurs propriétés de convergence théorique, ils peuvent être utilisés efficacement sur les calculateurs modernes.

Asymptotic and Hybrid Methods in Electromagnetics

Iran ANDRONOV (Université de St Pétersbourg),
 Daniel BOUCHE (CEA - DAM - Île-de-France),
 Frédéric MOLINET (Mothesim)
 IEE Press, 2005



Les méthodes asymptotiques permettent de calculer efficacement la diffraction d'ondes électromagnétiques par des objets très grands en termes de longueur d'onde. Elles déterminent les phénomènes physiques responsables du champ diffracté. En les hybridant avec des méthodes numériques qui calculent la diffraction par des détails de forme complexe, nous obtenons des méthodes précises et performantes.

Salles propres et zones à environnement contrôlé. Conception, réalisation et exploitation

Isabelle TOVENA-PECAUIT (CEA - Cesta)
 Éditions AFNOR, 2006



L'ouvrage aborde tous les aspects de la maîtrise de la propreté, quel que soit le secteur d'activité, depuis la conception et la réalisation, jusqu'à l'exploitation des salles propres ou zones à environnement contrôlé. Il explique tous les maillons de la chaîne de propreté : définition des types de contamination, analyse des risques, management, présentation des outils de contrôle, et les règles de l'art en matière d'exploitation et de réalisation.

Peut-on prévoir les tsunamis ?

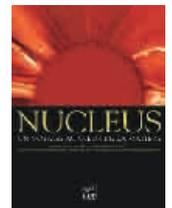
Hélène HÉBERT, François SCHINDÉLÉ
 (CEA - DAM - Île-de-France)
 Éditions le Pommier, 2006



Peut-on prévoir les tsunamis ? D'abord, qu'est-ce qu'un tsunami ? Comment se forme-t-il ? Peut-on échapper à ses vagues si particulières ? Comment déterminer où et quand se produiront les prochains tsunamis ? Et comment mettre en place une protection efficace ?

Nucleus. Un voyage au cœur de la matière

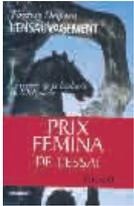
Ray MACKINTOSH, Jim AL-KHALILI, Björn JONSON, Teresa PEÑA
 Adaptation française de Daniel GUINET, Jean-François MATHIOT, Alexandre OBERTELLI, et Jean-Luc SIDA
 (CEA - DAM - Île-de-France)
 EDP Sciences, 2006



Nucleus vous amène dans un voyage pour explorer le cœur de la matière, là où se cache le noyau entouré de son nuage d'électrons. Ce beau livre, destiné à un large public, décrit avec simplicité ses propriétés surprenantes et la manière dont les scientifiques ont construit les modèles.

L'ensauvagement

Thérèse DELPECH (CEA - DAM)
Éditions GRASSET, 2006



Comme il y a cent ans, l'humanité est guettée par l'ensauvagement. Mais elle peut prévenir la combinaison des moyens de destruction dont elle dispose et des penchants nihilistes issus de la détresse contemporaine. Quelles idées méritent que nos sociétés post-héroïques prennent des risques pour les défendre ?

L'Iran, la bombe et la démission des nations

Thérèse DELPECH (CEA - DAM)
Éditions CERI/AUTREMENT, 2006



L'Iran a engagé avec la communauté internationale une dangereuse partie de poker nucléaire. Téhéran n'entend pas céder aux injonctions lui intimant de cesser les activités dissimulées aux inspecteurs internationaux pendant dix-huit ans. Mais au printemps 2006, les connaissances acquises sur les activités iraniennes ne laissent plus planer de doute sur les ambitions militaires de Téhéran.

Femtosecond laser pulses

Claude RULLIÈRE (CEA - Cesta)
Éditeur et co-auteur Claude RULLIÈRE, 2005



L'ouvrage est une introduction à la physique des impulsions lasers ultra-courtes, et à leurs applications. Il décrit les principes de fonctionnement des lasers impulsions, la génération et la caractérisation des impulsions courtes et leur utilisation en physique moléculaire, optique non-linéaire, réactivité chimique, et chimie analytique. Les deux derniers chapitres sont consacrés à la génération d'impulsions térahertz et attosecondes.

Menace terroriste, approche médicale : nucléaire, radiologique, biologique, chimique

Coordonné par T. DE REVEL et al., avec une contribution de Hervé RAOUL (CEA - DAM - Île-de-France)
Édité par John Libbey Eurotext, 2005



Cet ouvrage réunit les meilleurs experts nationaux de toutes les institutions médicales et de recherche. Il s'adresse aux acteurs de la santé publique, civils ou militaires. Dans ce volume, qui permet une lecture à la fois ciblée et transversale, le lecteur trouve les différents aspects liés à l'emploi des armes nucléaires, radiologiques, biologiques et/ou chimiques (NRBC) : historique, fondamental, diagnostique, thérapeutique, et préventif.

Fusion Science and Technology. Special Issue on Fast Ignition

Contributions

de Bruno LE GARREC, Nathalie BLANCHOT (CEA - Cesta)
Édité par M. CAMPBELL, R. FREEMAN, K. TANAKA,
49, n°3, avril 2006

Ce numéro donne un aperçu des activités de recherche, théoriques et expérimentales, sur l'ignition rapide en attaque directe. Les installations, en projet ou en cours de construction dans le monde, sont détaillées : schéma de base ; performances accessibles avec un éclairage plus important sur les oscillateurs à amplification paramétrique à dérive de fréquence (OPCPA), et sur les différentes technologies de compresseurs à mosaïques de réseaux.



Verifying Treaty Compliance: Limiting Weapons of Mass Destruction and Monitoring Tokyo Protocol

Co-auteur et co-éditeur : Michel RICHARD (CEA - DAM)
Éditions Springer, 2006

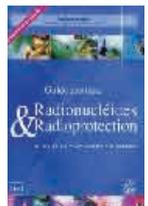
Ce livre présente une approche nouvelle de la question de la vérification des traités internationaux, à travers des analyses et des vues d'experts sur les systèmes de vérification existants. Il donne des orientations et des avis pour améliorer ces systèmes et répondre aux nouveaux défis sur le terrain.



Nouvelle édition de "Radionucléides & Radioprotection"

Contribution de Daniel DELACROIX
(CEA - DAM - Île-de-France)
EDP Sciences, 2006

Présenté sous forme de fiches pour plus de deux cents radionucléides, cet ouvrage est un recueil des données scientifiques, techniques et médicales ; issues des publications les plus récentes, ou établies à partir de modèles pertinents. Il s'agit d'aider l'utilisateur pour quantifier les risques d'exposition externe et interne, choisir les moyens de détection les plus adéquats, évaluer les protections, optimiser les postes de travail, etc.



SOUTENANCES HDR EN 2005 ET 2006

(Habilitation à Diriger des Recherches)



Denis AUTISSIER
CEA - Le Ripault 2005

Contribution à l'étude des propriétés hyperfréquences de matériaux ferrimagnétiques absorbants micro-ondes.



Alexia BALLAND-LONGEAU
CEA - Le Ripault 2005

La chimie organique et organométallique appliquée au développement de nouveaux matériaux organiques aux propriétés spécifiques.



Antoine BOURGEADE
CEA - Cesta 2005

Résolution numérique de systèmes hyperboliques : des écoulements réactifs à l'optique non linéaire.



Christophe BUET
CEA - DAM - Île-de-France 2005

Analyse mathématique et numérique de quelques modèles hydrodynamiques et cinétiques de la physique des plasmas.



Pierrick BUVAT
CEA - Le Ripault 2005

Conception, synthèse et mise en œuvre de polymères à structure contrôlée.



Jean-Marc CHEVALIER
CEA - Cesta 2005

Conceptions, réalisations et interprétations d'expériences appliquées à la détonique fondamentale, la physique des plasmas, et la physique des chocs.



Franck ENGUEHARD
CEA - Le Ripault 2006

Contribution à l'étude des phénomènes de transport de chaleur et de quantité de mouvement dans les milieux hétérogènes.



Véronique FERLET-CAVROIS
CEA - DAM - Île-de-France 2005

Comportement des technologies SOI sous irradiation.



Jean-Marc GOYHÉNÈCHE
CEA - Cesta 2005

Contribution à l'étude des transferts de chaleur par conduction et rayonnement dans les matériaux hétérogènes anisotropes.



Didier MATHIEU
CEA - Le Ripault 2005

Ingénierie moléculaire et simulation atomistique des matériaux énergétiques et organiques.



Ngoc Thanh-Ha NGUYEN-BUI
CEA - Cesta 2006

Modélisation des écoulements externes : application aérodynamique et combustion.



Pascal PALMAS
CEA - DAM - Le Ripault 2006

La RMN appliquée à la caractérisation structurale de matériaux organiques et leur cycle de vie.



Eric PILI
CEA - DAM - Île-de-France 2005

Géochimie des interactions fluides-roches, et dynamiques des systèmes géologiques et environnementaux.



Philippe PRENÉ
CEA - Le Ripault 2006

Revêtements Sol-Gel et applications.



Jean-Luc SIDA
CEA - DAM - Île-de-France 2005

Programme EFFE, étude de la fusion avec des faisceaux exotiques.



Bruno STUPFEL
CEA - Cesta 2006

Quelques méthodes numériques pour la diffraction électromagnétique par des objets inhomogènes.

