

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

1958-2018

ANS

DE SCIENCES

à la **Direction des Applications Militaires**

AVANCÉES RÉCENTES  
ET DÉFIS DE DEMAIN

60

ANS

DE SCIENCES À LA DAM

## ÉDITORIAL DU DIRECTEUR DES APPLICATIONS MILITAIRES

**D**epuis sa création en 1958, la DAM, la Direction des applications militaires du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), conçoit, réalise et garantit les performances et la sûreté des armes nucléaires de la France. Dans sa mission au service de la dissuasion nucléaire, la DAM pilote aussi la conception et la réalisation des chauffe-fusées nucléaires pour la propulsion navale. Elle est également responsable de l'approvisionnement et du recyclage des matières nucléaires stratégiques. La dissuasion nucléaire française dépend de la réussite de cette mission, qui s'inscrit dans une Œuvre Commune entre deux organismes, le Ministère des Armées et le CEA. Ce succès s'est matérialisé pour tous les projets de la DAM : le premier essai nucléaire (1960), la militarisation des engins opérationnels (1964), l'accès au thermonucléaire (1968), la montée en puissance des capacités françaises de dissuasion, l'équipement d'un missile balistique avec plusieurs têtes nucléaires, qui suivent chacune leur trajectoire, la conception de têtes nucléaires furtives, indétectables aux radars, le passage à l'ère de la « Simulation » en 1996, avec l'arrêt définitif des essais nucléaires et, depuis, le renouvellement des têtes nucléaires aéroportée (2009) et océanique (2016) garanties avec la Simulation.



**François GELEZNIKOFF**  
Directeur des applications  
militaires du CEA

Forte de son expertise, la DAM soutient les Autorités nationales dans la lutte contre la prolifération nucléaire, la lutte contre le terrorisme, et certains domaines de l'armement conventionnel.

Pour réussir sa mission dans le respect des coûts et des délais impartis par l'État, la DAM relève sans cesse des défis scientifiques et technologiques de premier plan. Ses équipes de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens se mobilisent au quotidien dans des domaines variés qui vont de l'infiniment petit, en physique nucléaire, à la dimension réelle de l'arme, avec la mécanique des structures. Les thèmes d'expertise couvrent la physique atomique, la physique de la matière condensée, la physique des plasmas, la physique du solide, la mécanique des fluides, la physique des chocs, la neutronique, l'électromagnétisme, la chimie sous toutes ses formes,

les procédés de fabrication, les lasers, l'optique, l'informatique, les mathématiques appliquées, l'analyse numérique, le traitement du signal, la gestion des données massives, la géophysique, l'environnement... De même, pour garantir le respect des caractéristiques fonctionnelles imposées sur les armes nucléaires, la DAM développe des matériaux innovants et des techniques de fabrication et de métrologie de pointe, ainsi que des modélisations physiques très poussées, qui couplent plusieurs échelles de l'espace et du temps, dans des domaines de température et de pression extrêmes. L'élaboration fine de ces modèles, leur résolution efficace et leur validation avec le niveau de précision requis sont particulièrement complexes et nécessitent une recherche de haut niveau, aussi bien en physique qu'en analyse numérique et en expérimentation.

La « Simulation » comprend la simulation numérique, avec le développement de modèles physiques et de calculateurs très performants, et l'amélioration continue de cette simulation grâce à la réalisation et l'exploitation de grandes installations expérimentales de physique.

L'objectif de cet ouvrage est de vous donner un aperçu des recherches menées à la DAM pour répondre aux grands enjeux nécessaires à la réussite de sa mission. Ainsi, si la compréhension du noyau atomique et de ses interactions (« *Comprendre la structure du noyau et ses interactions pour en extraire l'énergie* » p.9) est essentielle au fon-

ctionnement des charges nucléaires, la faculté de rendre des objets furtifs (« *Rendre les objets invisibles* » p.49) tout en garantissant leur résistance à des environnements extrêmes (« *Résister à tous les environnements* » p.41) est aussi indispensable pour conférer aux têtes nucléaires les capacités requises de pénétration des défenses, qui s'appuie sur une recherche de haut niveau dans le domaine des procédés et des matériaux (« *Procédés et matériaux : un savoir-faire spécifique* » p.71). Le passage à la « Simulation » à la DAM est également illustré au travers des recherches sur la maîtrise des échelles (« *Du microscopique au macroscopique : maîtriser et relier les échelles* » p.17) ou sur la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu (« *Comprendre et prévoir par la simulation* » p.25). Quant à l'expérimentation, pilier essentiel de la





démarche de Simulation et qui s'appuie sur les grandes installations de la DAM, elle est également mise en lumière dans l'article « *Produire la matière en conditions extrêmes et la sonder* » p.33. La lutte contre la prolifération des armes nucléaires et le terrorisme est aussi illustrée au travers de deux finalités que sont : la détection des essais nucléaires (« *A l'écoute du globe* » p.55) et l'analyse d'ultra-traces (« *Faire parler les ultra-traces* » p.63).

De par sa mission, la DAM a une visibilité à long terme sur les programmes qui lui sont confiés. Cela lui permet d'engager des recherches scientifiques très en amont et de déployer l'investissement de ses chercheurs et ingénieurs dans la durée. Cette spécificité explique aussi la grande qualité de l'œuvre scientifique de la DAM, qui a ainsi pu se doter d'outils de recherche exceptionnels, pour certains uniques au monde : infrastructures de calcul, laser Mégajoule, installation franco-britannique de radiographie Epure, réacteur d'essais pour la propulsion nucléaire...

La DAM a su développer une compétence spécifique en ingénierie afin de maîtriser à la fois les performances, coûts, délais et risques de ces grands projets, menés pour certains sur deux décennies. L'apport scientifique de ces grands moyens est également présenté dans cet ouvrage.

Les recherches menées par la DAM au service des programmes que l'État lui confie ont conduit à de nombreuses découvertes, de multiples réalisations et à l'aboutissement de projets ambitieux.

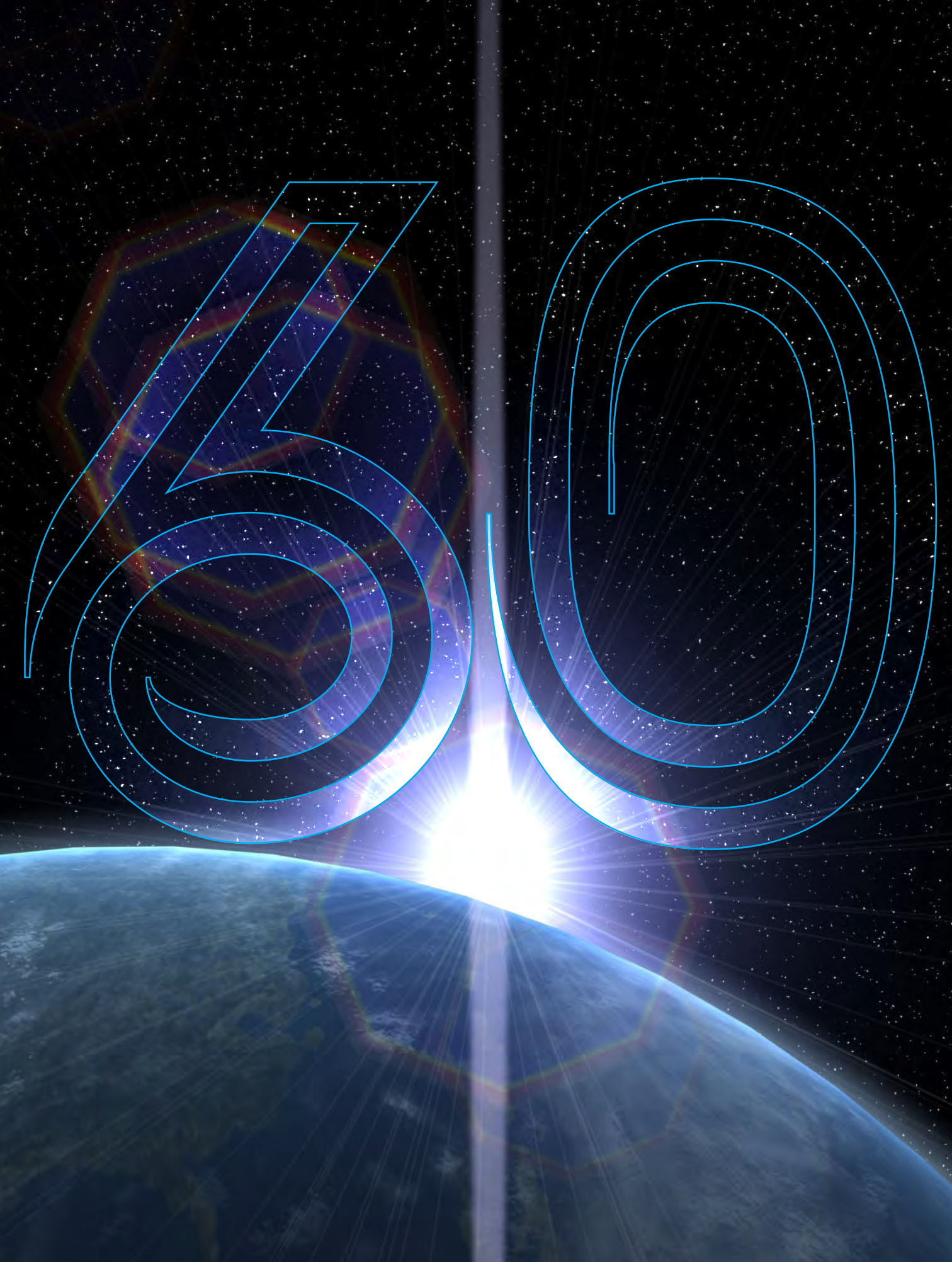
Ces succès témoignent non seulement de l'engagement et de l'excellence des équipes de la DAM, mais aussi de leur capacité à collaborer avec d'autres équipes, industriels français, de la start-up au grand groupe, autres directions opérationnelles du CEA et laboratoires de recherche français ou internationaux, pour que ses travaux restent innovants et performants et contribuent à la dynamique scientifique et technologique de notre pays.

Cette excellence se concrétise ainsi par une production scientifique considérable (vu la limite imposée par la confidentialité), avec plus de 2 000 publications par an, dont 400 dans les meilleures revues scientifiques internationales, et le dépôt d'une trentaine de brevets chaque année, avec la conception de logiciels informatiques en open source ou encore le codéveloppement avec d'autres laboratoires d'outils de simulation physique au meilleur niveau mondial. Cette visibilité scientifique de la DAM, qui respecte la confidentialité globale de ses travaux, participe avant tout à la crédibilité de la dissuasion nucléaire française.

---

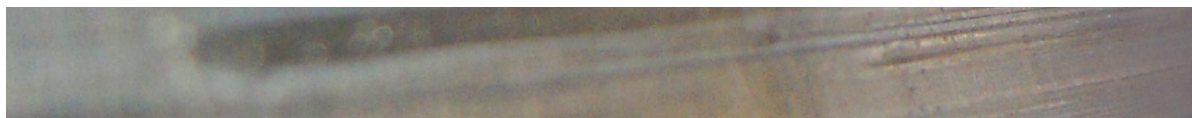
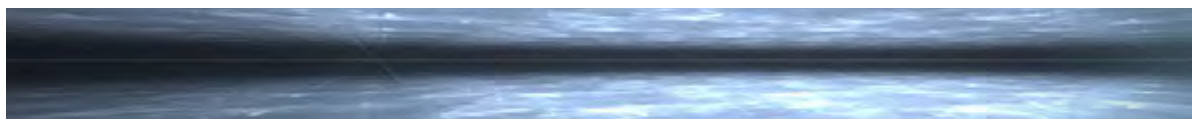
***Cet ouvrage témoigne de l'exploration scientifique extraordinaire que réalisent les chercheurs de la DAM, depuis près de soixante ans, et des grands défis qui les attendent pour remplir leur mission au service de la France.***

---



60 ANS

DE SCIENCES À LA DAM  
AVANCÉES RÉCENTES ET DÉFIS DE DEMAIN



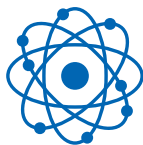
# SOMMAIRE

|   | PAGE |
|---|------|
|  Comprendre la structure du noyau et ses interactions pour en extraire l'énergie | 9    |
|  Du microscopique au macroscopique : maîtriser et relier les échelles            | 17   |
|  Comprendre et prévoir par la simulation   | 25   |
|  Produire la matière en conditions extrêmes et la sonder                        | 33   |
|  Résister à tous les environnements  | 41   |
|  Rendre les objets invisibles  | 49   |
|  À l'écoute du globe   | 55   |
|  À la recherche des ultra-traces   | 63   |
|  Procédés et matériaux : un savoir-faire spécifique                            | 71   |



**COMPRENDRE**  
**LA STRUCTURE DU NOYAU**  
**et ses interactions pour en extraire l'énergie**





***La physique du noyau et de ses réactions a mobilisé depuis des décennies des équipes de chercheurs, théoriciens, mais aussi expérimentateurs, de très haut niveau. Ces travaux, dont le CEA est un des acteurs majeurs, ont permis de maîtriser la réaction en chaîne, soit sous forme stabilisée, dans les centrales, soit sous forme amplifiée, dans les armes nucléaires. Ils ont aussi permis de modéliser le cycle de vie des étoiles et de comprendre la naissance des matériaux terrestres. Mais il reste encore beaucoup à découvrir.***

## COMPRENDRE LA STRUCTURE DU NOYAU ET SES INTERACTIONS POUR EN EXTRAIRE L'ÉNERGIE

**L**e noyau, au sein de l'atome, est un objet paradoxal à plus d'un titre. À température et pression ambiantes, sa position interne dans l'atome le rend peu visible au niveau macroscopique, contrairement aux électrons, constituants externes de l'atome. Les électrons donnent à la matière son volume (voir « *Produire la matière en conditions extrêmes et la sonder* »). Ils déterminent aussi les propriétés des éléments chimiques, selon la classification périodique de Mendeleïev, et assurent la liaison entre atomes pour former les molécules et donner leur cohésion aux solides. Le noyau, au centre de l'atome, paraît avoir essentiellement pour rôle de fournir le potentiel attractif autour duquel s'organise le cortège électro-nucléaire. Pourtant, lors des processus de fission, où un noyau lourd se scinde, ou de fusion, où deux noyaux légers se regroupent, le noyau réagit et dégage des quantités d'énergie phénoménales. Un autre paradoxe est que cet objet, de très petite taille, est capable, quand il est soumis à un flux de neutrons, de réagir avec des sections, dites efficaces, importantes, très supérieures à sa surface physique. Ces fortes sections efficaces ont surpris les premiers expérimentateurs au point qu'ils ont appelé barn (ce qui signifie grange en anglais...) l'unité de mesure associée.

Pour maîtriser le noyau et en extraire l'énergie, il faut bien comprendre sa structure et la manière dont il réagit. Depuis des décennies, la recherche théorique et expérimentale sur la phy-

sique du noyau et de ses réactions a permis notamment de maîtriser la réaction en chaîne, sous forme stabilisée, dans les centrales, comme sous forme amplifiée, dans les armes nucléaires. Mais les recherches se poursuivent, notamment à la DAM, pour comprendre encore plus en profondeur la physique du noyau, et modéliser de manière toujours plus précise sa structure et ses interactions. Voyons d'abord ce qui permet au noyau d'exister, à savoir l'interaction nucléaire, puis comment on détermine sa structure en résolvant le problème à  $N$  nucléons.

### Calcul de la structure du noyau : interaction nucléaire et problème à $N$ nucléons

#### L'interaction nucléaire

Nous savons, depuis les années 1930, que le noyau est constitué de nucléons, c'est-à-dire de neutrons et de protons. Les protons, particules chargées positivement, exercent donc les uns sur les autres des forces électrostatiques de répulsion, proportionnelles à l'inverse du carré de la distance entre eux, donc d'autant plus importantes que le noyau est de très petite taille. On mesure ces dimensions dans une unité spécifique, le fermi, qui vaut  $10^{-15}$  mètre. Les plus gros noyaux stables ont un rayon de moins de 10 femtomètres.

Pour compenser les forces de répulsion coulombienne, qui ont tendance à disperser les protons du noyau, il faut donc une force attractive entre nucléons : elle

est produite par l'interaction nucléaire. Cette dernière, à l'inverse de l'interaction coulombienne, n'est pas l'une des interactions fondamentales et n'est pas connue exactement. Pour en comprendre l'origine, il est nécessaire d'aller encore plus au cœur de la matière et de s'intéresser à la structure du nucléon. Ce dernier, en dépit de son très faible rayon (moins de 1 fermi), est un objet composite. Il est constitué de trois quarks, liés entre eux par l'une des interactions fondamentales, l'interaction forte ou chromodynamique. Les quarks interagissent en échangeant les particules médiatrices de cette interaction : les gluons. Les simulations chromodynamiques du nucléon montrent que les flux de gluons sont principalement confinés dans des tubes de force, d'où s'échappe un faible flux résiduel, qui génère l'interaction entre les nucléons.

L'interaction nucléaire n'est donc qu'une fuite de l'interaction forte, un peu comme les forces de Van der Waals entre molécules sont une fuite de l'interaction coulombienne. La modélisation à partir de simulations de chromodynamique quantique d'un système de deux nucléons est un domaine de recherche actif, qui mobilise d'importants moyens de calculs. Mais la faiblesse de la fuite par rapport au flux principal n'a pas permis à ce jour d'obtenir, à partir de ces simulations, des prévisions quantitativement satisfaisantes de l'interaction entre nucléons. Il faudrait des simulations d'une précision totalement hors de portée des moyens de calcul actuels ou même envisageables à moyen terme.





En conséquence, la forme de l'interaction (dite nue) entre deux nucléons isolés découle de considérations physiques, mais son intensité doit être déterminée par des mesures, par exemple de sections efficaces de collisions entre nucléons. Elle est attractive, avec une portée courte, mais finie, et un cœur répulsif (généralisé par le principe d'exclusion de Pauli : les quarks constitutifs des nucléons sont des fermions). Elle est plus complexe qu'un simple potentiel dépendant de la distance entre nucléons et apparaît comme une somme de termes, dont certains par exemple dépendent des spins (ou moments magnétiques intrinsèques) des nucléons. Ces différents termes dépendent de paramètres qui sont ajustés pour reproduire au mieux les résultats expérimentaux.

Cette interaction nue ne permet pas de calculer tous les noyaux, à cause notamment de l'apparition de divergences dans les calculs, liées au cœur répulsif de l'interaction. Elle est actuellement limitée au calcul des noyaux qui comportent un nombre de nucléons relativement faible. Mais à la DAM, nous devons aussi déterminer la structure des noyaux lourds, jusqu'aux actinides. Nous utilisons pour cela des méthodes de champ moyen, présentées ci-dessous, et des interactions dites effectives, dont la forme et les paramètres visent à reproduire au mieux les propriétés d'un ensemble de noyaux. Il n'y a donc pas une, mais de multiples interactions effectives. Celle utilisée à la DAM est issue des travaux de Daniel Gogny<sup>1</sup> et porte son nom. Une de ses spécificités est d'inclure des termes de portée finie, ce qui lui permet d'être plus précise et plus générale que les forces à portée nulle de type Skyrme, utilisées notamment en astrophysique. Elle est ainsi capable de prévoir, avec un seul jeu de paramètres, les propriétés d'un ensemble étendu de noyaux, ce qui est essentiel pour la simulation du fonctionnement des armes nucléaires. L'utilisation de plus en plus large de l'interaction de Gogny à l'extérieur de la DAM, à l'IPN d'Orsay et à l'université de Madrid notamment, est une reconnaissance de la qualité de ses prévisions.

<sup>1</sup> Daniel Gogny, physicien nucléaire de grand talent, a réalisé l'essentiel de ses travaux à la DAM. Un article retraçant sa carrière a été publié en 2017 dans « *European Physical Journal A* », n° 53.

Le lecteur se demande peut-être à juste titre le rapport entre les deux méthodes de calcul : interaction nue et interaction effective. Dans le cadre d'une collaboration avec la Direction de la Recherche Fondamentale du CEA, les résultats obtenus par les deux méthodes sont comparés sur un ensemble de noyaux avec des nombres pairs de protons et de neutrons. Ces comparaisons montrent des formes d'interaction proches de l'interaction effective de Gogny, et permettent de déterminer avec une précision accrue certains de ses paramètres. En somme, les deux méthodes se complètent et se confortent. Le choix de Daniel Gogny d'une interaction effective qui respecte la portée finie et le cœur répulsif, propriétés essentielles de l'interaction nue, se révèle particulièrement pertinent !

Les travaux pour améliorer la force de Gogny se poursuivent, avec par exemple l'introduction de termes supplémentaires dans l'interaction et l'inclusion de portée finie dans l'ensemble des termes. Une interaction plus précise est en effet essentielle pour une prévision encore plus fiable de la structure des noyaux et des sections efficaces des réactions. Mais il faut aussi bien sûr des méthodes de calcul efficaces pour déterminer l'agencement des nucléons dans le noyau, ou en termes plus techniques, résoudre le problème à  $N$  nucléons.

### Le problème à $N$ nucléons

Les  $N$  nucléons du noyau s'organisent collectivement sous l'effet des interactions nucléaire et électromagnétique. Mais une difficulté apparaît : la fonction d'onde (le carré du module de cette fonction d'onde détermine la probabilité de présence de la particule) de l'ensemble des nucléons est définie dans un espace à  $3N$  dimensions. Sans approximation, le problème n'est soluble que pour des  $N \leq 3$ . Pour pouvoir se ramener à un nombre de dimensions raisonnable, même pour  $N$  grand, une des méthodes les plus efficaces, utilisée aussi en physique atomique, consiste à supposer que chaque nucléon est soumis au champ de forces généré par l'ensemble des autres : c'est l'approche dite de champ moyen.

La fonction d'onde d'ensemble est alors obtenue de manière autocohérente : on itère jusqu'à convergence entre calcul

des fonctions d'onde individuelles des nucléons et calcul du champ généré par l'ensemble des nucléons. Les calculs montrent, comme dans les atomes, une organisation en couches successives, avec un nombre de places déterminé dans chaque couche. Les nucléons vont ainsi occuper les couches successives.

Dans les atomes, le potentiel central du noyau impose une symétrie sphérique. Ce n'est pas le cas dans les noyaux, où les nucléons s'organisent collectivement. Si certains noyaux (dits magiques<sup>2</sup>) sont sphériques, d'autres peuvent prendre des formes de sphéroïdes aplatis ou, plus souvent, allongés. Les noyaux non sphériques ont, comme dans les molécules diatomiques, des spectres rotationnels, avec des niveaux d'énergie dont l'espacement est déterminé par le moment d'inertie du noyau par rapport à l'axe de rotation actif : petit axe de l'ellipse pour un noyau sphéroïdal allongé.

Une autre complication spécifique à la physique nucléaire est le fort appariement entre nucléons de même nature et de spins opposés. Les nucléons s'associent par paires, comme les électrons qui, dans les supraconducteurs, s'associent en paires de Cooper, ou les atomes d'hélium 3, qui forment un superfluide à très basse température. Il faut bien sûr tenir compte de ce couplage pour calculer la structure des noyaux. Les effets de superfluidité associés diminuent ainsi les moments d'inertie et sont donc visibles sur les spectres d'émission et d'absorption des noyaux. La spectroscopie est une bonne manière de vérifier que les formes prévues par les calculs sont justes !

Si l'approximation du champ moyen avec prise en compte de l'appariement est satisfaisante dans la majorité des cas, la fonction d'onde postulée, combinaison de fonctions à un nucléon, est parfois trop restrictive. Une approche plus générale, dite multiparticules-multitrous, part d'une forme plus générale de la fonction d'onde, prenant en compte non pas une seule, mais un mélange de configurations.

<sup>2</sup> Les noyaux magiques doivent leur sphéricité et leur stabilité à leurs couches complètement remplies : tous les états disponibles sont occupés. Les analogues atomiques de ces noyaux sont les gaz rares.

Cette approche, plus précise, mais beaucoup plus coûteuse, a été développée récemment, en particulier à la DAM, grâce à l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs. Elle ne permet toutefois pas encore le calcul des noyaux d'actinides, à grand nombre de nucléons, qui fait intervenir des matrices de très grande taille.

Les progrès des calculateurs et des méthodes numériques permettront certainement d'accroître la masse des noyaux calculables par cette approche dans quelques années, avec, à la clé, une compréhension encore plus fine de leur structure.

### Une vue d'ensemble des noyaux

La stabilité d'un noyau est mesurée par sa demi-vie, temps nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents se soient transformés. Il existe un très grand nombre de noyaux, certains indéfiniment stables, d'autres à temps de vie très court.

Un élément chimique a par définition un nombre de protons donné, mais comporte parfois un nombre de neutrons variable : on parlera d'isotopie nucléaire. La figure 1 présente les noyaux connus, classés en fonction du mécanisme de décroissance.

Le noyau le plus simple est l'hydrogène ordinaire, composé d'un seul proton. Il a un isotope stable, le deutérium, et un isotope de demi-vie 12 ans, le tritium. Les noyaux stables relativement légers ont un nombre de neutrons et de protons égaux. Pour les noyaux plus lourds, le nombre de neutrons excède celui des protons.

Les noyaux stables vont jusqu'à l'élément 82, à savoir le plomb. Mais sont présents naturellement sur Terre des éléments plus lourds, jusqu'à l'uranium, élément 92 dont l'isotope 238 a une demi-vie de plusieurs milliards d'années. Au-delà s'ouvre le domaine des éléments synthétisés, dont le plutonium (élément 94). L'isotope 239 de cet élément a une demi-vie de 24 000 ans. L'élément le plus lourd synthétisé  $Og_{118}^{294}$  a une durée de vie inférieure à la microseconde.

Un îlot de stabilité pour des noyaux encore plus lourds est prévu par la théorie, mais son existence reste à confirmer.

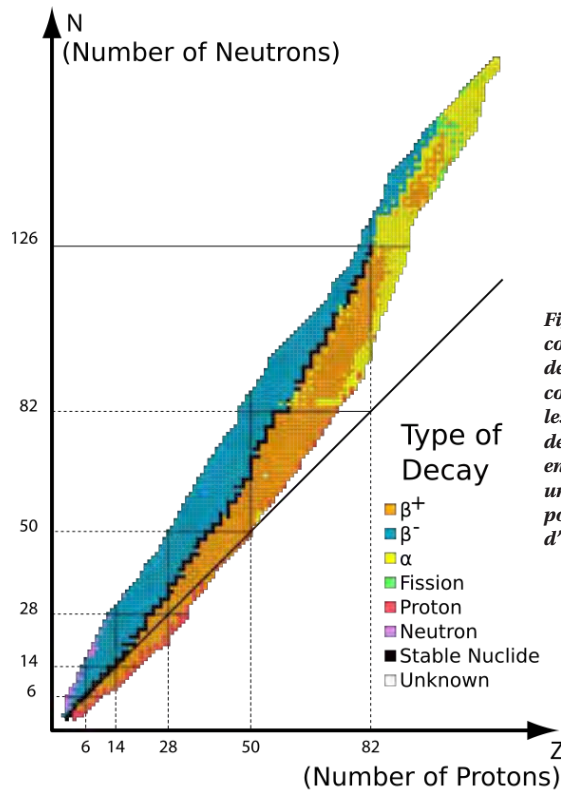


Figure 1. Classement des noyaux connus en fonction du mécanisme de décroissance. La ligne noire correspond à la vallée de stabilité, les couleurs aux mécanismes de décroissance : le noyau se transforme en émettant un neutron, un proton, un électron (décroissance  $\beta^-$ ) ou un positon ( $\beta^+$ ) ou encore un noyau d'hélium 4 ( $\alpha$ ).

À la DAM, nous nous intéressons principalement aux noyaux capables de fusionner ou de fissionner, car on utilise ces réactions dans le fonctionnement d'une arme nucléaire. Nous allons expliquer ces phénomènes à partir de considérations énergétiques.

### Fusion et fission des noyaux

L'énergie de liaison par nucléon a une forme générale relativement simple (Figure 2) : elle augmente d'abord

avec le nombre de nucléons, passe par un maximum pour le fer, puis décroît<sup>3</sup>.

On peut donc récupérer de l'énergie en faisant fusionner deux noyaux assez légers, ou en fissionnant un noyau lourd. En pratique, seuls certains noyaux sont capables de fusionner ou de fissionner.

<sup>3</sup> Les pics locaux sont dus aux effets de couche : les noyaux à couches complètes sont plus liés.

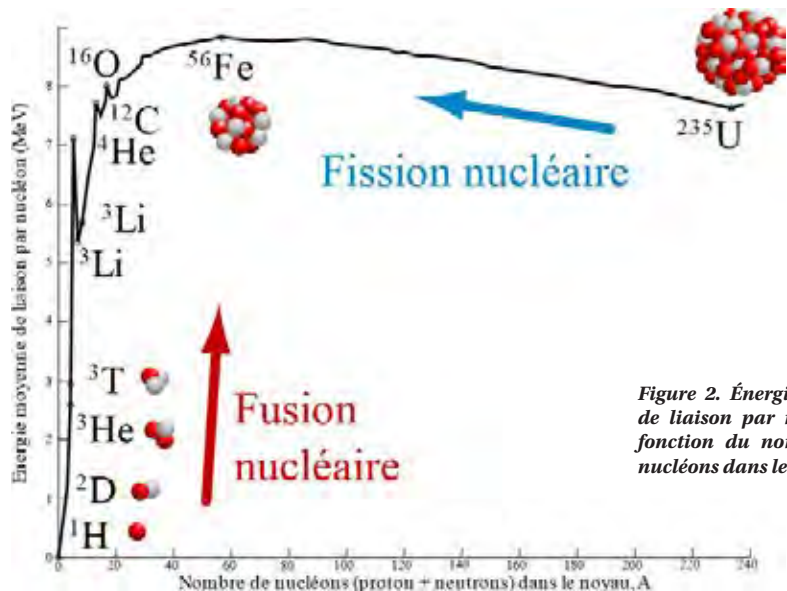


Figure 2. Énergie moyenne de liaison par nucléon en fonction du nombre A de nucléons dans le noyau.





## Fusion des noyaux légers

La portée de l'interaction nucléaire est très courte et les noyaux ne vont fusionner que s'ils sont très proches : il faut donc vaincre l'interaction coulombienne répulsive, proportionnelle au produit des charges des noyaux. C'est pourquoi seuls les noyaux les plus légers peuvent en pratique fusionner. Les réactions de fusion les plus efficaces, au sens où leur section efficace est assez importante, se produisent entre les isotopes lourds de l'hydrogène, le deutérium (D) et le tritium (T). La réaction de fusion  $D + T$  en He (hélium) + n dégage une énergie colossale : 17,6 MeV par réaction unitaire, soit environ  $2,1 \cdot 10^{14}$  Joules par kilogramme de combustible, à comparer aux quelques  $4,5 \cdot 10^7$  Joules par kilogramme d'essence. La raison en est la différence entre la forte énergie de liaison du He et celle assez faible de D et de T. Les équipes de la DAM ont grandement contribué à la compréhension fine de cette réaction, tant du point de vue théorique, avec une modélisation précise (dite en voies couplées), que du point de vue expérimental.

## Fission des actinides

La fission des noyaux lourds ne se fait qu'en passant une barrière d'énergie, en général trop haute sauf pour quelques noyaux dits fissiles. Parmi ceux-ci, les plus représentatifs sont l'uranium 235 et le plutonium 239. L'énergie dégagée est de 180 MeV par réaction unitaire. L'ordre de grandeur de cette énergie peut être estimé par examen de la figure 2. L'énergie de liaison par nucléon est plus grande (d'un peu moins d'un MeV) pour les produits de fission que pour les noyaux lourds : l'énergie dégagée par la fission d'un noyau à A nucléons est donc un peu moins de A MeV<sup>4</sup>. La fission est une source d'énergie essentielle pour les applications du nucléaire, qu'elles soient civiles ou militaires. Il faut donc la prévoir avec précision. Mais c'est un processus extraordinairement complexe, faisant appel à des déformations extrêmes du noyau et mettant en jeu des processus dynamiques.

<sup>4</sup> Par exemple, la fission de l'uranium 235 libère une énergie de 180 MeV.

La DAM, en collaboration avec ses homologues américains, s'appuie donc sur le triptyque modélisation physique, simulation numérique, validation expérimentale pour y parvenir.

## La fission modélisée et simulée

D'un point de vue théorique, la fission est modélisée comme une déformation continue du noyau fissionnant, depuis sa déformation initiale (matérialisée sur la figure 3 par un petit cercle rouge), en passant par un paysage de cols, de vallées et de sommets, sculpté par les effets de couches nucléaires, vers des états de déformations extrêmes (matérialisés sur la figure 3 par la ligne rouge formant la frontière avec la zone blanche : la ligne de scission), au-delà desquels le noyau perd sa cohésion et se scinde en deux fragments. La première étape d'un modèle de fission consiste donc à obtenir ce paysage appelé surface d'énergie potentielle. Comment ? En calculant l'énergie du système pour chaque point du maillage de l'espace des paramètres de déformation. Sur la figure 3, le paysage est ainsi calculé pour deux paramètres de déformation : l'élongation et l'asymétrie. La seconde étape du calcul consiste à laisser évoluer un paquet d'ondes, en partant d'une fonction d'onde initiale pour le noyau, dans une approche dépendante du temps, à travers ce paysage énergétique, depuis la déformation initiale jusqu'à la ligne de scission.

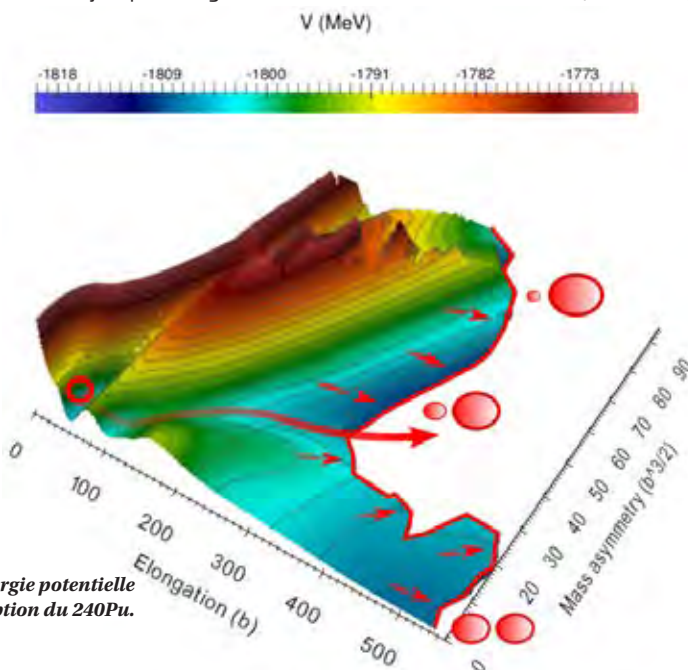


Figure 3. Surface d'énergie potentielle associée à la description du  $^{240}\text{Pu}$ .

Puis il s'agit de comptabiliser le flux de la fonction d'onde en différents points de cette ligne de scission. Cette approche permet de prévoir la probabilité des différentes cassures possibles du noyau fissionnant : les rendements de fission. Suivant le point de traversée de la ligne de scission, la fission est plus ou moins symétrique, comme cela est représenté sur la figure 3 par les disques rouges sur la droite de la figure. Les calculs de chaque point du paysage énergétique sont indépendants, si bien que cette approche peut être parallélisée sur un grand nombre d'unités de calcul (c'est-à-dire que les calculs de chaque point sont menés séparément et simultanément) en tirant le meilleur parti des machines massivement parallèles de la DAM. Mais la fission est un processus très complexe, et il faut valider ces calculs par des expériences.

## La fission expérimentée

Pour valider les approches théoriques, il faut des expériences discriminantes (c'est-à-dire dont les résultats permettent de confirmer ou d'infirmer la théorie), très précises. Dans cette optique, le spectromètre de recul SOFIA a été développé et implanté au GSI (à Darmstadt), dans le cadre d'une collaboration internationale menée par la DAM et regroupant le GSI, l'IPN Orsay, le CENBG de Bordeaux, les universités de Chalmers (en Suède), de Saint Jacques de Compostelle et de Vigo (en Espagne).

L'expérience, représentée sur la figure 4, est réalisée en cinématique inverse : les noyaux lourds sont accélérés et projetés sur une cible. L'interaction avec la cible les fait fissionner, et les fragments produits sont déviés d'un angle dépendant de leur masse par le champ magnétique de l'aimant Aladin.

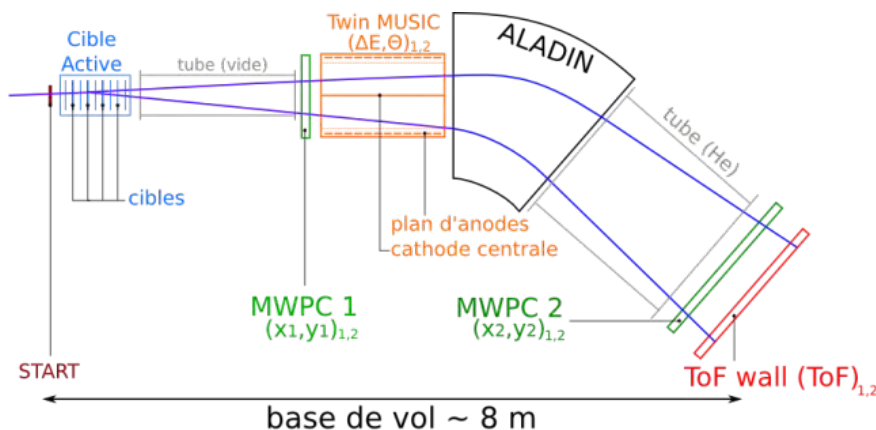
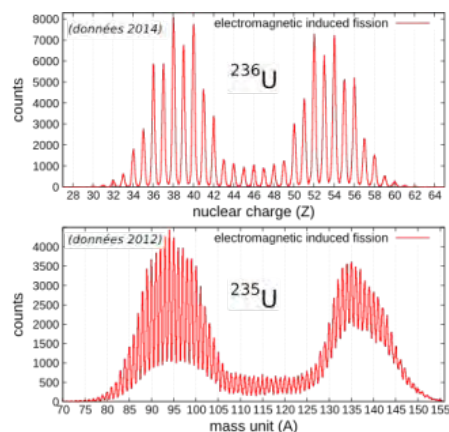


Figure 4. Schéma de l'expérience menée sur le spectromètre de recul SOFIA.



Leur temps de vol est mesuré (sur un dispositif Time of Flight, ou ToF) avec une très faible incertitude<sup>5</sup> : moins de 30 picoseconde ( $10^{-12}$  seconde), ce qui permet de déterminer de façon univoque la masse et la charge des fragments.

De plus, l'extrême précision des mesures de masse rend possible, par soustraction, l'obtention d'informations sur les neutrons émis dans la fission. Aujourd'hui, les mesures de rendement à SOFIA constituent une référence à l'aune de laquelle sont comparées toutes les autres mesures de rendements de fission. La figure 5 présente, à titre d'exemple, les rendements isotopiques mesurés pour la fission de l'uranium 235. On voit que ce noyau fissionne principalement en fragments inégaux. Cette dissymétrie est liée aux effets de couche, qui favorisent les fragments les plus stables.

Nous avons parlé de la fission et de la fusion, toutefois elles ne sont pas, loin s'en faut, les seules réactions nucléaires d'intérêt, comme nous allons le voir maintenant.

## Les réactions nucléaires

### Une physique variée et complexe

Les noyaux collisionnés par particules (neutrons, photons, particules alphas, autres noyaux) sont le siège d'une grande variété de réactions nucléaires. Les plus connues sont la fission et la fusion, mais le noyau peut aussi dévier la particule sans changer d'état (on parle de collision élastique), se mettre à tourner ou à vibrer, ou encore émettre une ou plusieurs particules. La connaissance précise des sections efficaces de toutes ces réactions est essentielle pour prévoir de façon fiable le fonctionnement des armes et des réacteurs nucléaires.

### Évaluation des réactions nucléaires, calculs et expériences

Historiquement, le calcul microscopique, c'est-à-dire à partir des degrés de liberté des nucléons et de l'interaction effective de la physique nucléaire, s'est surtout développé pour le traitement de la structure des noyaux, comme présenté plus haut. Mais récemment, et grâce encore une fois au développement de la puissance de calcul, ces mêmes approches ont pu être appliquées aux réactions nucléaires, avec un même niveau d'approximation.

De plus, la disponibilité des ressources de calcul a permis de dépasser le stade du calcul « héroïque » pour appliquer ces méthodes aux cas réellement utiles pour les applications de la DAM.

Ainsi, la DAM a développé le code de réactions nucléaires TALYS en collaboration avec le Nuclear Research Group (NRG) de Petten, aux Pays-Bas.

Actuellement, plus de cent millions d'heures de calcul sont capitalisées

dans la base de données du code. TALYS s'appuie également sur des résultats expérimentaux. Calculs et expériences concourent ainsi à déterminer les sections efficaces de réactions. Mais comme ni les mesures ni les calculs ne sont d'une précision absolue, ces sections efficaces sont assorties d'incertitudes.

Ces travaux théoriques et expérimentaux servent à construire des fichiers de données nucléaires évaluées, qui synthétisent au mieux l'ensemble des connaissances. En ce qui concerne les programmes de la DAM, ces données évaluées contribuent à l'élaboration des « standards » de simulation, c'est-à-dire d'outils de simulation validés dans leur domaine d'application. Les mêmes outils sont aussi utilisés pour élaborer, conjointement avec la Direction de l'Énergie Nucléaire du CEA, les données évaluées qui alimentent ensuite la bibliothèque internationale JEFF (JEFF 3.2 en 2014 et JEFF3.3 en 2017).

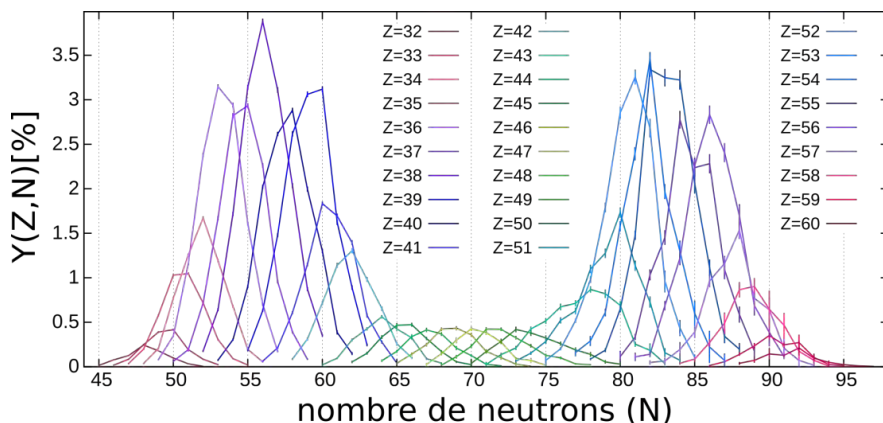


Figure 5. Rendements isotopiques mesurés pour la fission de l'uranium 235 sur le spectromètre de recul SOFIA.

<sup>5</sup> La mise au point de l'expérience SOFIA a demandé de franchir de nombreux verrous technologiques, dont le plus dimensionnant a été cette très grande précision de la mesure de temps de vol.





La DAM se focalise sur l'évaluation à moyenne énergie avec le code TALYS, la DEN, sur les basses énergies avec le code CONRAD. Le numéro 40 de la revue *Chocs* est consacré aux données nucléaires [1].

Terminons en revenant sur le second paradoxe évoqué dans l'introduction : les sections efficaces de fission de l'U235 et du Pu 239 sont très supérieures à leurs surfaces physiques (de l'ordre de 1,5 barn), comme on peut le voir sur la figure 6.

Ce phénomène, qui conditionne l'efficacité de la production d'énergie nucléaire, ne peut être compris et modélisé que grâce à tous ces travaux de compréhension de la physique, de mise au point de méthodes de calcul, et d'implémentation informatique, dont nous avons essayé de donner un aperçu.

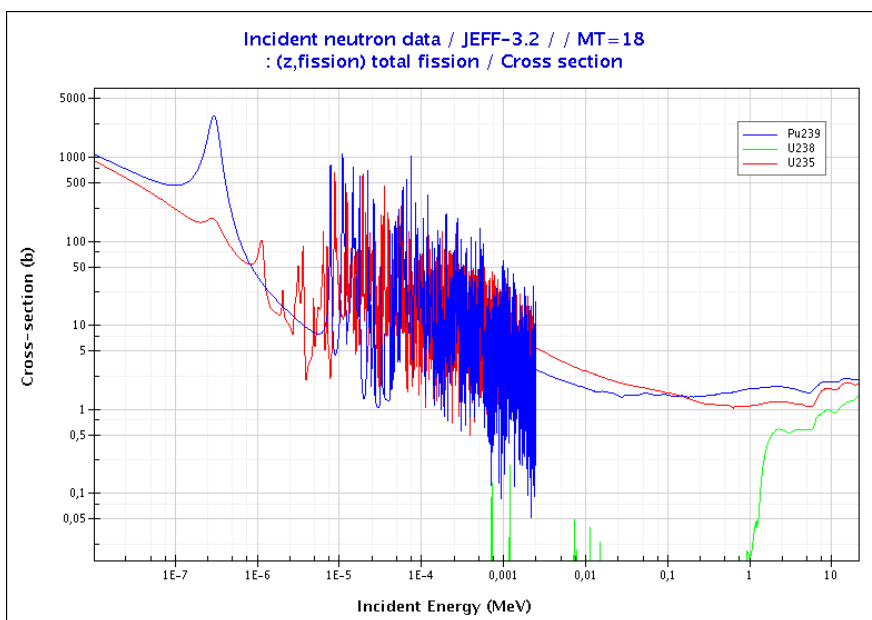


Figure 6. Sections efficaces de fission de l'U235, de l'U238 et du Pu 239 en fonction de l'énergie d'un neutron incident.



## CONCLUSION

La détermination de la structure du noyau et de ses sections efficaces de réactions est à la croisée de plusieurs disciplines de la physique, avec, au premier rang, la physique nucléaire, mais aussi l'astrophysique et la physique des hautes énergies.

La modélisation et la simulation numérique jouent un rôle de plus en plus important, mais l'expérience reste indispensable, avec une demande croissante de précision dans les mesures, et de belles réalisations technologiques. La difficulté des problèmes et l'importance des enjeux encouragent les coopérations internationales entre laboratoires.

Les équipes de la DAM regroupent des physiciens, théoriciens et expérimentateurs, qui s'appuient de façon intensive sur la simulation, et sont fortement impliquées dans des collaborations, au niveau national et international. La mobilisation de toutes ces énergies et de ces compétences pluridisciplinaires a permis d'affiner notre compréhension, de prévoir avec plus

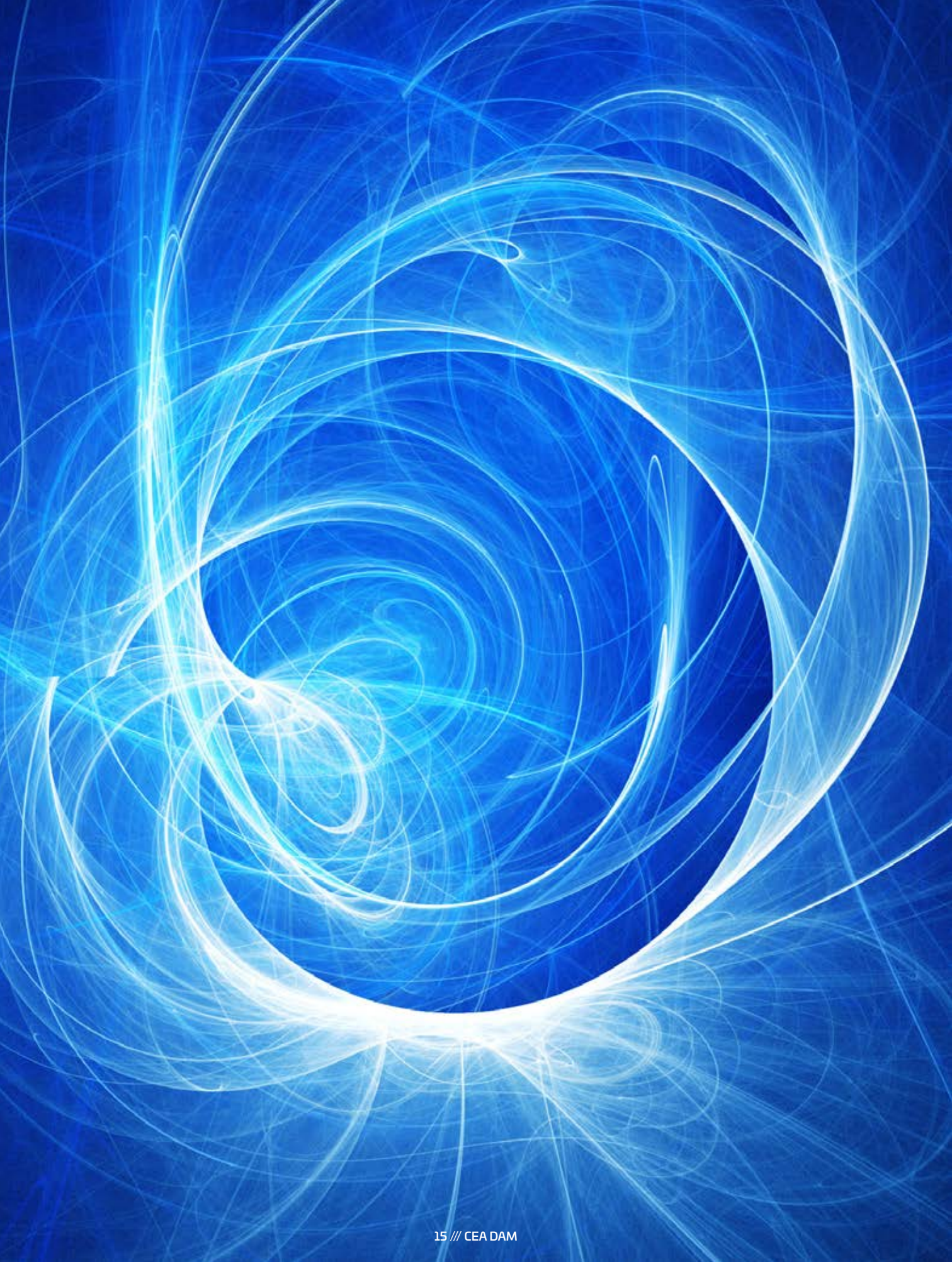
de fiabilité la structure du noyau et de réduire les incertitudes sur les sections efficaces de réactions. Toutefois des chantiers restent ouverts.

La DAM ira vers une compréhension de plus en plus *ab initio* (c'est-à-dire reposant sur de moins en moins d'hypothèses) des phénomènes nucléaires, grâce à des modélisations plus fines, permises par l'augmentation des capacités de calcul, mais aussi grâce aux progrès de la description des forces nucléaires, qui intégreront une physique toujours plus riche.

L'expérience ne sera pas en reste et sera déterminante pour contraindre les modèles, avec, dans ce domaine aussi, une recherche de précision croissante.

### Référence :

[1] Données nucléaires, Revue Chocs, n°40, juillet 2011.



The background of the entire page is a dark blue field filled with numerous out-of-focus, glowing blue circles of varying sizes and brightness, creating a bokeh effect. The text is centered in the middle of the image.

# DU MICROSCOPIQUE AU MACROSCOPIQUE

**maîtriser et relier les échelles**





***Pour concevoir un objet, comme une arme nucléaire, il faut simuler son comportement à toutes les échelles : du niveau atomique au niveau macroscopique, dans son environnement. Les simulations « multiéchelles » permettent d'y parvenir.***

## DU MICROSCOPIQUE AU MACROSCOPIQUE : MAÎTRISER ET RELIER LES ÉCHELLES

**S**imuler, c'est quoi ? C'est prévoir le comportement d'un phénomène ou son résultat, ou reproduire artificiellement une situation réelle, afin de les démontrer ou de les expliquer. La conception et l'ingénierie d'objets complexes supposent des simulations, et ce, sur une large gamme d'échelles d'espace et de temps. Un exemple ? Considérons une sonde spatiale dotée d'un système de protection thermique en matériau composite (de carbone) qui, sous l'effet des hautes températures produites par l'écoulement hypersonique, « s'ablate » lors de son entrée dans l'atmosphère – c'est-à-dire qu'elle perd de sa matière.

De nombreuses échelles sont présentes dans ce problème, depuis l'échelle atomique (de l'ordre de l'ångström) des réactions chimiques homogènes (gazeuses) et hétérogènes (réactions gaz-matériau), et des changements de phase éventuels, jusqu'à l'échelle macroscopique de l'objet lui-même dans son environnement (l'écoulement de l'atmosphère autour de lui).

Entre les deux, se situent les échelles constitutives du matériau composite : échelle nanoscopique décrivant l'organisation du matériau (dans l'exemple traité, il s'agit d'une fibre de carbone), échelle microscopique de la fibre (quelques microns), échelle mésoscopique du composite (quelques dixièmes de millimètres).

Dans l'écoulement turbulent autour de l'objet coexistent toutes les échelles de la turbulence depuis l'échelle de dissipa-

tion visqueuse (la dizaine de microns), où l'énergie cinétique est dissipée sous l'effet de la viscosité de l'air, à celle des grands tourbillons, en passant par la couche d'air au voisinage de l'objet, dite couche limite (le centimètre).

### La simulation « multiéchelle »

La simulation numérique de l'ensemble du système à l'échelle la plus fine est hors de portée des ordinateurs les plus puissants. Il faut donc non seulement maîtriser l'ensemble des échelles pertinentes, mais être capable de les relier : on parle de simulation « multiéchelle ». Ce terme générique désigne un ensemble de méthodes appliquées dans des domaines très divers.

La DAM a souvent à résoudre des problèmes multiéchelles : celui de la rentrée de la tête nucléaire dans l'atmosphère, proche du problème de rentrée d'une sonde spatiale évoqué plus haut, en est un.

Nous allons en présenter d'autres, également rencontrés dans les armes, et associés, comme déjà dit, à des comportements physiques extrêmement divers, en allant du plus simple au plus complexe.

Nous commencerons avec le problème de la prévision des propriétés des matériaux microstructurés, qui fait intervenir une seule physique, une seule équation, et un petit nombre (deux ou trois) d'échelles.

Nous poursuivrons avec le problème de la simulation des écoulements turbulents, où apparaît un continuum d'échelles, mais un seul jeu d'équations. Nous présenterons ensuite les limites des simulations hydrodynamiques, et la nécessité de les compléter et de les alimenter par des simulations de transport de particules : deux équations interviennent donc. Nous concluons avec le problème de la simulation multiéchelle des matériaux, où chaque échelle est gouvernée par des équations et des lois physiques différentes.

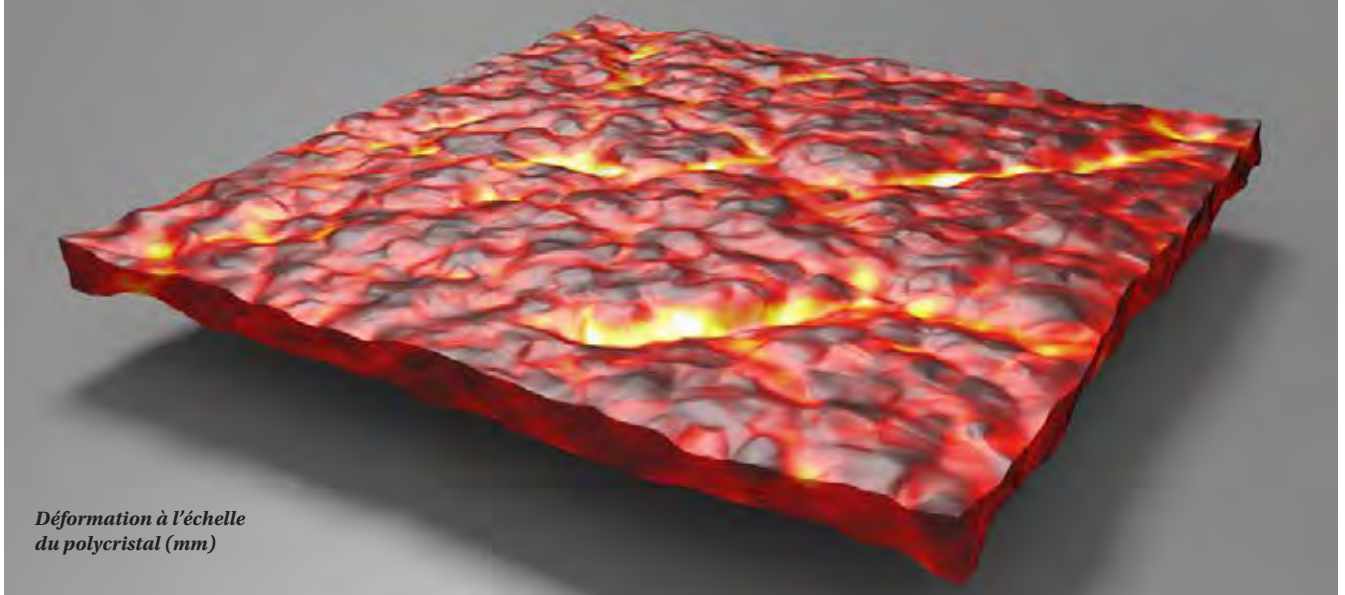
### Prévoir les propriétés des matériaux microstructurés : un problème à 2 échelles

L'enveloppe externe d'une tête nucléaire, appelée corps de rentrée, est conçue et fabriquée à la DAM. Ce corps de rentrée est chargé d'assurer les fonctions principales de protection thermomécanique et de discrétion (permettant d'échapper à la détection radar) de la charge nucléaire.

Une telle enveloppe est constituée de différentes couches de matériaux qui ont chacune un rôle pour résister aux sollicitations rencontrées.

Ces conditions extrêmes (notamment de température : voir « Résister à tous les environnements »), tout comme les exigences drastiques de





Déformation à l'échelle du polycristal (mm)

discrétion (voir « *Rendre les objets invisibles* ») sont difficiles à satisfaire à l'aide de matériaux homogènes.

Il faut donc avoir recours à des composites micro- (voire nano-) structurés, dont il faut prédire les propriétés : module d'élasticité, conductivité thermique pour le corps de rentrée, permittivité électrique et perméabilité magnétique pour la couche de discrétion.

Un calcul global (à l'échelle du mètre) résolu à l'échelle locale (celle de la micro-structure) est encore hors de portée des ordinateurs, même les plus puissants (voir « *Comprendre et prévoir par la simulation* »). Il faut donc relier l'échelle locale à l'échelle globale.

Pour des structures composées d'un grand nombre de motifs géométriques répétés périodiquement (matériaux nid d'abeilles), ou aléatoirement (matériaux renforcés par des fibres, matériaux poreux), l'idée est alors de chercher un motif en matériau homogène « équivalent » au motif de base.

Par exemple, pour un problème de mécanique, on calcule la déformation du motif de base sous l'effet d'une contrainte, et on réalise une moyenne des résultats sur le motif.

Le matériau équivalent restitue la courbe contrainte moyenne-déformation moyenne obtenue. On imagine aisément qu'un matériau poreux sera représenté par un matériau équivalent moins « raide » (i.e. avec un module d'Young plus faible) que le matériau de base non poreux.

Cette idée a été formalisée et traduite en une procédure de calculs dans la théorie de l'homogénéisation [1].

Au sens strict, cette méthode, mathématiquement rigoureuse, est fondée sur une analyse à deux échelles du problème. La petite échelle est celle du motif, la grande, celle de l'objet.

En pratique, on résout numériquement une équation aux dérivées partielles (EDP) sur la cellule de base. La théorie fournit ensuite une formule pour les propriétés du matériau équivalent, exprimées comme des moyennes pondérées sur la cellule.

Il reste à calculer le comportement de l'objet en matériau équivalent à grande échelle, i.e. avec des mailles très grandes par rapport au motif de base.

Ce calcul donne le comportement global de l'objet et les champs homogénéisés : contraintes et déformation pour un problème de mécanique, températures pour un problème thermique, champs électriques et magnétiques pour un problème d'électromagnétisme, etc.

On déduit enfin les champs locaux des champs homogénéisés et du calcul sur la cellule de base.

De nombreux exemples d'applications ont été présentés dans [2]. S'il existe plusieurs échelles emboîtées, par exemple dans le cas d'un matériau fibré, avec des fibres présentant une structure complexe, l'opération d'homogénéisation est effectuée plusieurs fois, comme dans le cas de la sonde spatiale évoqué en introduction.

## La théorie de l'homogénéisation

Les méthodes d'homogénéisation ont été utilisées et généralisées à la DAM, en collaboration avec les universités de Bordeaux et de Tours, afin de les adapter à nos problèmes : en particulier, les équipes du CEA ont souvent à travailler avec des couches minces, pour lesquelles les interfaces, non prises en compte dans la théorie classique de l'homogénéisation, doivent être traitées. L'homogénéisation est l'outil adapté si les échelles du problème sont bien séparées.

Nous allons maintenant voir ce qui se passe quand il existe un continuum d'échelles. Nous prendrons pour exemple la turbulence.

## Écoulements turbulents, un exemple de continuum d'échelles

Un écoulement devient turbulent quand son nombre de Reynolds, noté  $Re$ , est au-dessus d'un certain seuil, dépendant de la configuration de l'écoulement, mais en général de l'ordre de quelques milliers pour la plupart des écoulements.

En termes physiques, le nombre de Reynolds mesure le rapport des forces d'inertie sur les forces visqueuses. Plus précisément, ce nombre est obtenu en divisant le produit  $VL$  d'une échelle  $L$  par une vitesse  $V$ , caractéristiques de l'écoulement, par la viscosité cinématique  $\nu$  du fluide en écoulement, i.e.  $Re=VL/\nu$ .

Dans le cas d'un objet se déplaçant dans un fluide,  $L$  sera une dimension de l'objet et  $V$ , sa vitesse. Pour nos applications, tant les écoulements autour de la tête nucléaire lors de son vol et de sa rentrée dans l'atmosphère que ceux rencontrés lors du fonctionnement de l'arme nucléaire, les vitesses très grandes, associées à des dimensions de l'ordre du décimètre ou du mètre, et à des viscosités relativement faibles, conduisent à des nombres de Reynolds très supérieurs au seuil, si bien que nos écoulements sont pleinement turbulents. Les échelles des mouvements du fluide dans de tels écoulements vont de l'échelle de dissipation visqueuse  $l_d = (v^3 / \varepsilon)^{1/4}$ , où  $\varepsilon$  est la dissipation d'énergie turbulente ( $\varepsilon$  mesure la dissipation en chaleur de l'énergie cinétique de l'écoulement par effet de viscosité), jusqu'à celle des mouvements d'ensemble du fluide.

Heureusement, si la turbulence est stationnaire, homogène et isotrope à ces échelles, elles s'organisent en cascade de Kolmogorov [3] et leur

spectre en énergie  $E(k)$  est donné par la loi de Kolmogorov  $E(k) = C_k \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$ , où  $k$  est le nombre d'onde, et  $C_k$ , une constante « universelle ».

De plus, le flux d'énergie est constant le long de la cascade : l'énergie produite aux grandes échelles « cascade » jusqu'aux petites échelles où elle est dissipée par la viscosité. La simulation numérique est devenue un instrument performant de prédiction des écoulements turbulents. Pour les écoulements à fort nombre de Reynolds, la simulation « directe », où toutes les échelles sont représentées (Direct Numerical Simulation ou DNS), reste hors de portée des plus puissants ordinateurs : la plus petite échelle peut être de l'ordre du micron, et la plus grande, de l'ordre du mètre.

Mais l'analyse de Kolmogorov permet de modéliser le continuum de petites échelles et de ne pas les simuler explicitement, c'est-à-dire de ne pas les résoudre sur le maillage. Deux grandes classes de méthodes sont utilisées.

## ≡ Traiter les échelles non résolues

### Simulation des grandes échelles

La méthode dite de Simulation des Grandes Echelles (SGE ou *Large Eddy Simulation*) résout les grandes échelles sur le maillage et modélise les petites par la dissipation qu'elles engendrent sur les grandes. La séparation entre petites et grandes échelles est fixée par la taille de maille et doit être comprise dans la cascade de Kolmogorov.

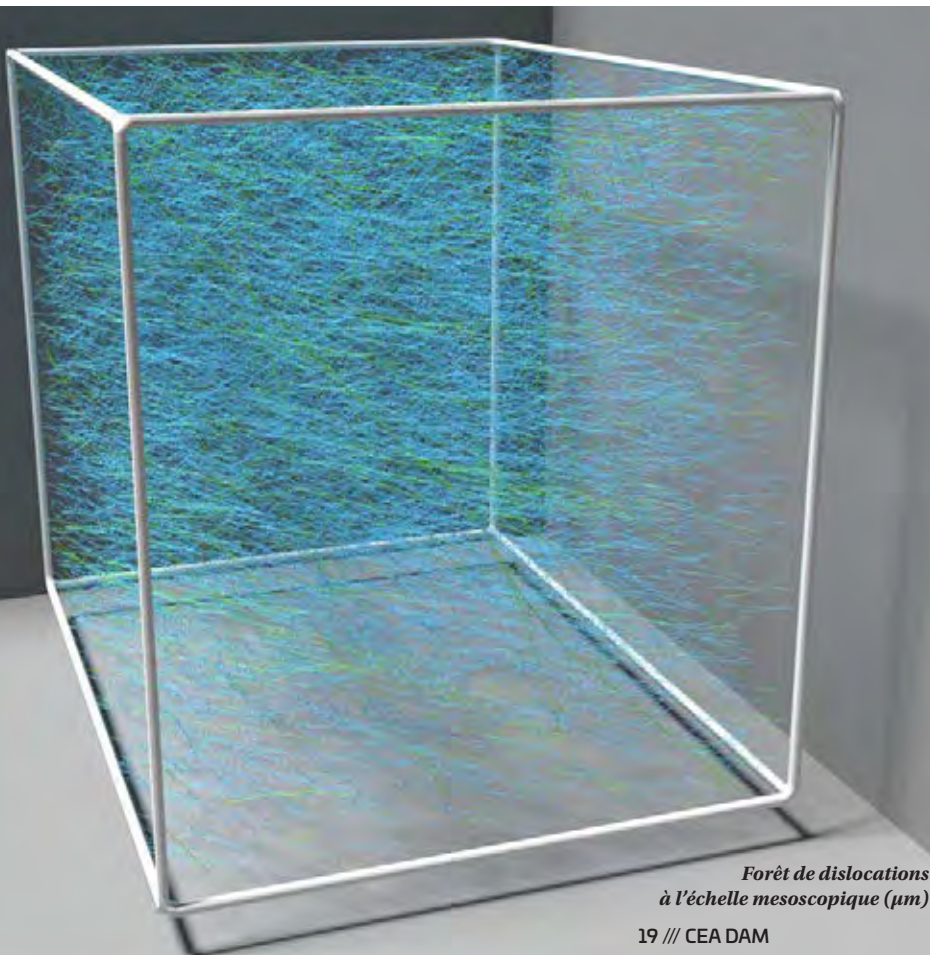
### Méthodes statistiques

Cette hypothèse est vérifiée *a posteriori* : les plus petites échelles résolues sur le maillage doivent s'organiser en cascade de Kolmogorov. Les méthodes statistiques sont une alternative à la SGE. Elles séparent l'écoulement en une partie moyenne (résolue par la simulation) et une partie aléatoire. Des prises de moyennes conduisent alors à des équations avec des moyennes sur des produits de termes aléatoires, par exemple les fluctuations de vitesse. Il faut exprimer ces moyennes à l'aide des quantités moyennes, et de constantes dites de fermeture, déterminées par simulation directe, à l'échelle de la dissipation visqueuse, ou empiriquement.

Un modèle statistique largement utilisé pour prédire les écoulements naturels ou industriels est le modèle  $(k, \varepsilon)$ , où  $k$  est l'énergie cinétique turbulente moyenne des carrés des fluctuations de vitesse (multipliée par la densité du fluide), et  $\varepsilon$ , la dissipation d'énergie turbulente déjà évoquée plus haut. Tant la SGE que les méthodes statistiques reposent sur l'hypothèse que les échelles non résolues sont en équilibre et isotropes.

Or, nos écoulements, particulièrement ceux rencontrés lors du fonctionnement de l'arme nucléaire, présentent des spécificités – constantes de temps très petites, fortes hétérogénéités, forte anisotropie – peu propices à la satisfaction de cette hypothèse.

Il a donc fallu retravailler les modèles, notamment statistiques, pour étendre leur domaine de validité, et les compléter dans certains cas par d'autres modèles s'affranchissant de ces hypothèses [4].



Forêt de dislocations à l'échelle mesoscopique ( $\mu\text{m}$ )





Une fois obtenus les modèles appropriés, il reste à concevoir les schémas numériques capables de les résoudre avec précision et fiabilité, et à les tester sur des expériences dédiées ou sur les tirs nucléaires passés. Tous ces travaux ont été menés en collaboration avec des équipes de laboratoires universitaires, notamment le Centre de mathématiques et leurs applications, à l'ENS Paris Saclay. Toutefois, l'équation à grande échelle est du même type que l'équation de départ, ce qui n'est pas toujours le cas, comme le montre l'exemple suivant.

### Transport de particules et écoulements fluides

Nous avons l'habitude de simuler les écoulements fluides avec des variables macroscopiques : densité, pression, température, concentrations des espèces. Mais, à l'échelle microscopique, le phénomène physique est le mouvement d'un ensemble de particules en interaction : au cours de leurs mouvements, les particules subissent des collisions. Ce mouvement des particules est décrit par des équations dites cinétiques, ou de transport, gouvernant l'évolution dans le temps des fonctions dites de distribution, qui dépendent de la posi-

tion mais aussi de la vitesse des particules. Les simuler à l'aide des équations de l'hydrodynamique est possible si les échelles microscopique (libre parcours moyen des particules, défini comme la distance moyenne entre deux collisions) et macroscopique (longueur caractéristique de l'écoulement hydrodynamique) sont suffisamment séparées (en d'autres termes, si beaucoup de collisions se produisent, même sur de petites distances...). Quand cette condition n'est pas vérifiée, il faut revenir aux équations gouvernant la population de particules. Cela a un coût : les 3 dimensions de l'espace des vitesses s'ajoutent aux 3 dimensions spatiales et le problème est maintenant posé dans un espace à 6 dimensions ! Il faut donc, pour chaque phénomène, déterminer le domaine de validité de l'approximation macroscopique, pour éviter deux écueils : utiliser une approximation hydrodynamique non pertinente, et avoir les coûts de calcul d'une résolution cinétique superflue.

L'hypothèse fluide est très adaptée à la simulation des armes nucléaires, mais se trouve prise en défaut dans plusieurs circonstances quand on l'applique à la simulation de plasmas produits dans les expériences avec le laser Mégajoule (voir article « Produire la matière en conditions extrêmes et la sonder »). En effet, dans ces milieux, la quantité de collisions peut être insuffisante : le libre parcours moyen des particules devient comparable à la longueur caractéristique hydrodynamique.

Les phénomènes physiques produits, regroupés sous le vocable « interaction laser plasma », doivent être décrits avec soin, car ils sont susceptibles notamment de dégrader le fonctionnement de la cible laser, d'une part, en rétrodiffusant une partie de la lumière du laser (qui ne contribue plus alors à l'implosion), et, d'autre part, en engendrant des échanges d'énergie par croisement des faisceaux laser, ce qui perturbe la symétrie d'implosion. Ainsi, les simulations de croisement de faisceaux doivent être réalisées avec des logiciels qui résolvent les équations du transport pour les électrons du plasma, appelés codes cinétiques. Même si l'équation change, la physique fondamentale reste la même (il s'agit toujours de transport de parti-

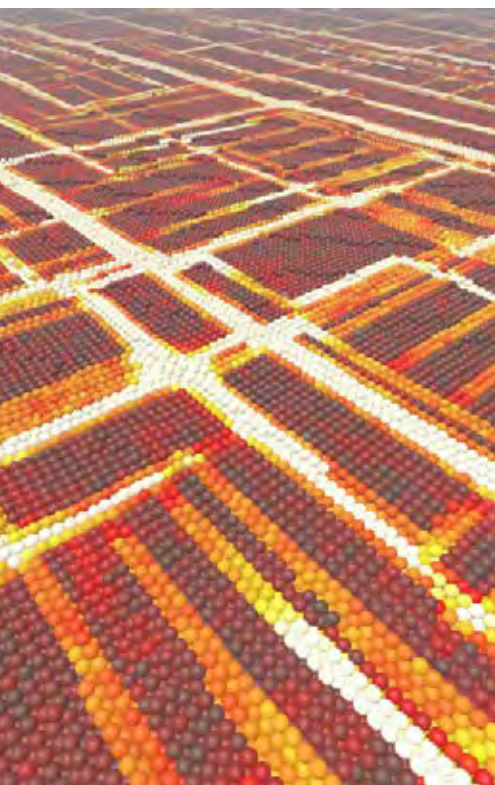
cules) avec l'échelle considérée. Dans d'autres cas, les différentes échelles doivent être traitées avec des modèles spécifiques, et vont faire apparaître de nouveaux objets, à une échelle intermédiaire entre celle des atomes et l'échelle courante (ou macroscopique), comme nous allons le voir avec l'exemple des matériaux.

### Simulation multiéchelle du comportement des matériaux

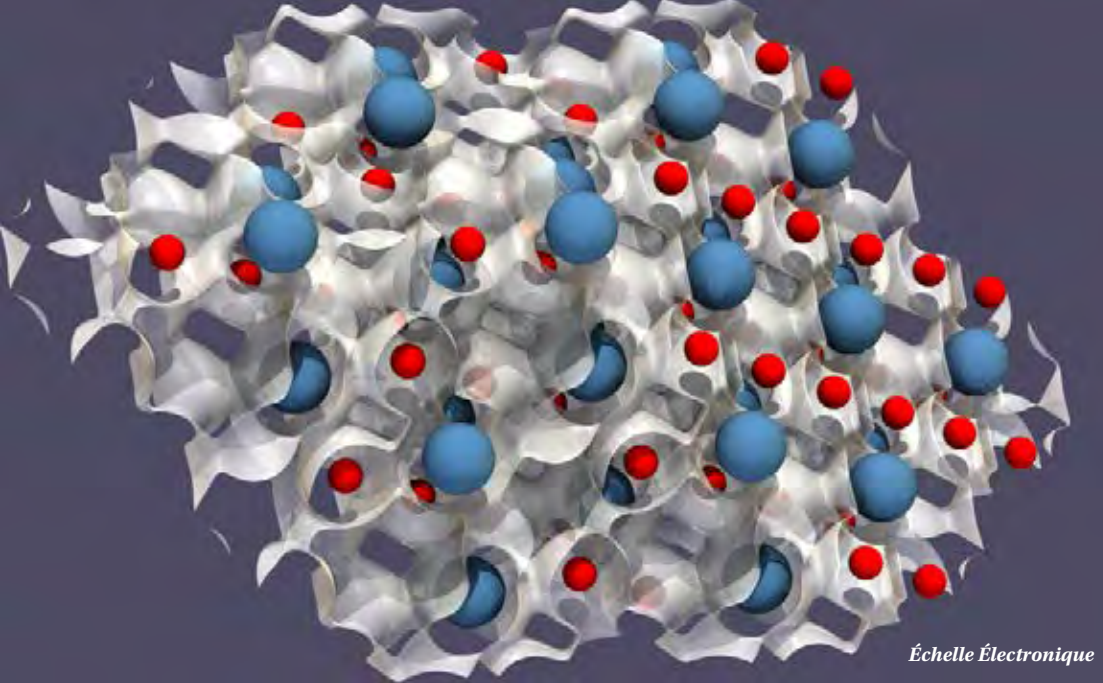
Si, pour des liquides ou des plasmas, il est suffisant de connaître l'équation d'état, qui donne la pression en fonction de la densité et de la température, la situation est plus complexe pour des matériaux solides. Il faut pouvoir dire comment ils se déforment quand on les contraint (ou comment ils résistent quand on leur impose une déformation) : l'expression consacrée pour la relation contrainte / déformation est « loi de comportement ».

L'expérience quotidienne nous montre l'immense diversité de comportements des matériaux selon leur nature (il est plus aisé de déformer un bloc de caoutchouc qu'une pièce métallique), selon leur température (l'acier suffisamment chauffé devient malléable, pas avec les doigts !); et selon la rapidité plus ou moins grande de la déformation imposée (pour décoller une étiquette, il est prudent de ne pas tirer trop vite). Toute cette variété de comportements physiques a été classée à l'aide de noms savants (élasticité, plasticité, fluage), que nous éviterons, au profit du terme un peu général de « loi de comportement ». Pour nos applications, une connaissance précise de la loi de comportement du matériau fissile constitutif de la partie initiale de la charge nucléaire est essentielle à une prédiction fiable de son fonctionnement.

La détermination des lois de comportement des matériaux est un problème multiéchelle emblématique, de par son intérêt théorique et économique et sa complexité : plusieurs échelles, avec des comportements physiques différents, apparaissent, comme nous allons le voir.



Échelle Atomique : nm



Échelle Électronique

un problème de structure électronique. Ce potentiel est ensuite utilisé pour calculer directement les forces (qui en dérivent) entre atomes.

Bien entendu, le potentiel ne restitue pas tout le comportement physique du problème, mais s'en approche. On résout ensuite les équations de la dynamique classique pour calculer les positions des atomes sous l'effet des forces exercées. La dynamique moléculaire « classique » permet de simuler un ensemble de quelques millions

à quelques milliards d'atomes, donc des objets de l'ordre du dixième de micron.

### Matériaux : des simulations multi- échelles nécessaires

La cohésion et les propriétés locales des matériaux sont déterminées par les électrons. Pour l'essentiel, le noyau, qui est quand même à l'origine des armes nucléaires, (voir « Comprendre la structure du noyau et ses interactions pour en extraire l'énergie ») peut maintenant être considéré comme une masse chargée quasiponctuelle dont la fonction principale est de produire le potentiel coulombien (attractif) qui permet de tenir les électrons (l'autre effet est de donner la masse).

On sait depuis les années 1920 que les électrons sont régis par la mécanique quantique (sinon, ils viendraient se coller sur le noyau, ce qui réduirait la diversité des phénomènes physiques).

Plus précisément, ils sont décrits par leurs fonctions d'onde : le carré du module de ces fonctions, qui vérifient l'équation de Schrödinger, donne leur probabilité de présence. L'échelle la plus fondamentale (et la plus petite) est donc celle des fonctions d'onde des électrons des atomes, que ces atomes soient quasi isolés au sein d'un gaz monoatomique dilué, ou liés au sein de la structure cristalline d'un solide.

En toute rigueur, un système à  $n$  électrons est décrit par une fonction d'onde collective : on dit que les électrons sont corrélés.

Ces fonctions d'onde sont toutefois calculées à une approximation raisonnable en résolvant des équations de Schrödinger monoélectroniques, par exemple issues de la théorie dite de la fonctionnelle de la densité, dans un potentiel autocohérent.

La résolution est de l'ordre du dixième d'ångström, la taille des objets traités de l'ordre du nanomètre. Or, la loi de comportement d'un matériau est déterminée par des objets physiques, par exemple, pour un métal, les grains (petits cristaux constitutifs du métal), de l'ordre de quelques microns, qu'il est impossible de traiter à une échelle aussi petite.

La prédiction de la loi de comportement demande donc de remonter de l'échelle « électronique » (l'ångström) à celle du grain (le micron), en utilisant plusieurs échelles intermédiaires.

Une simulation locale à l'échelle inférieure va servir à calculer les paramètres physiques de la simulation à l'échelle supérieure.

### De l'échelle de l'électron à celle de l'atome

La première étape consiste à s'affranchir de la détermination globale des fonctions d'onde électroniques. Pour cela, un potentiel d'interaction entre atomes est déterminé en résolvant localement

### De l'échelle de l'atome au continuum

La déformation plastique du matériau est gouvernée par les mouvements de défauts linéaires du réseau cristallin, appelés dislocations, dont les déplacements permettent aux plans cristallins de glisser les uns par rapport aux autres. Ces dislocations interagissent entre elles et avec le réseau par des forces élastiques. Les dislocations se multiplient (engendrant une « forêt » de dislocations), se transforment, s'annihilent. Les paramètres régissant les interactions entre dislocations sont calculés à l'échelle atomique par la dynamique moléculaire.

Une fois ces paramètres déterminés, on s'affranchit de l'échelle atomique. La dynamique des dislocations simule l'évolution d'objets mésoscopiques (les dislocations) en interaction mutuelles et avec le réseau dans un matériau soumis à une déformation.

Le durcissement sous déformation plastique (écrouissage) du matériau est dû à leur multiplication : la « forêt » exerce sur les dislocations des forces qui s'opposent à leur déplacement. Il faut augmenter la contrainte pour déformer davantage le matériau, qui « s'écroute ». Les matériaux réels sont constitués de grains monocristallins séparés par des joints de grain.





Le passage à l'échelle comporte donc deux étapes : la première permet de traiter un grain, la seconde, un ensemble de grains, en somme, le matériau réel.

#### a) Déformation du grain

La dynamique des dislocations permet de simuler les premiers stades de la déformation plastique et le durcissement (écrouissage) au niveau d'un grain (un monocristal) de matériau.

Pour de fortes déformations, le nombre de lignes de dislocations à considérer devient trop grand. Il faut donc passer à une échelle supérieure, où les dislocations ne sont plus suivies individuellement. On se contente de calculer les densités et les vitesses moyennes des dislocations suivant les systèmes de glissement, et les contraintes d'écoulement sur chacun de ces systèmes, fonction de ces densités.

La dynamique des dislocations sert à calculer les paramètres de ce modèle de plasticité locale, au niveau du grain.

#### b) Du mono au polycristal

Enfin, les matériaux réels sont des assemblages polycristallins de grains monocristallins. Une étape d'homogénéisation permet de passer du mono au polycristal et de prédire le comportement du matériau réel, ce qui fournit la contrainte en fonction de la déformation.

La simulation multiéchelle des matériaux est donc un processus complexe, qui passe par étapes de l'échelle de la fonction d'onde à l'échelle macroscopique : fonctions d'onde, atomes, dislocations, déformations.

À chaque échelle, l'équation résolue et le comportement physique changent.

Cette discipline relativement récente, aux applications multiples, est en évolution rapide.

À moyen terme, appuyée sur le calcul haute performance, elle permettra de prédire le comportement et plus généralement les propriétés d'un matériau avant même de le synthétiser, c'est-à-dire de produire un double digital d'un matériau imaginé en laboratoire.

Les applications industrielles sont bien sûr considérables.

La DAM est un des acteurs majeurs de cette thématique, pour ses applications propres, mais aussi à l'extérieur, en particulier au sein du CESIMAT (Centre d'Expertise en Simulation de Matériaux), regroupant, à Bruyères-le-Châtel, de grands industriels, comme Michelin, Safran, Faurecia et l'Oréal.



## CONCLUSION

Les domaines d'application de la simulation multiéchelle sont en constante expansion, en physique comme en ingénierie. Nous en avons montré quelques-uns, en progressant du plus simple au plus compliqué.

L'homogénéisation permet une prédiction fiable des propriétés d'objets composites en mécanique, thermique, électromagnétisme, en particulier.

La simulation multiéchelle sait s'adapter à la présence d'un continuum d'échelles, comme dans le cas des écoulements turbulents, et permet de traiter à coût raisonnable des problèmes de transport de particules en milieu hétérogène. Il devient possible de simuler, par une méthode multiéchelle, des propriétés non locales des matériaux, comme la déformation plastique.

Ce type d'applications est aux frontières des possibilités actuelles de ces méthodes, mais produit déjà des résultats, et ouvre de larges perspectives, comme la conception sur ordinateur de nouveaux matériaux pour l'industrie.

Enfin, il faut souligner que la progression de la fiabilité et l'extension du domaine d'application de ces méthodes n'ont été possibles que grâce à l'augmentation de la vitesse des calculateurs (voir « *Comprendre et prévoir par la simulation* ») et aux progrès des méthodes numériques.

La DAM, associée aux universités et instituts de recherche français, dont l'INRIA et l'ONERA, regroupe les compétences en physique, mathématiques appliquées, et dispose de moyens de calcul performants pour développer et utiliser les méthodes multiéchelles.

Elle est et sera plus encore à moyen terme un pôle important de ce domaine scientifique étendu et pluridisciplinaire aux multiples applications.

#### Références

- [1] D. Bergmann et al « les méthodes de l'homogénéisation, théorie et applications en physique » Eyrolles, 1985.
- [2] « Modélisation multiéchelle », Revue Chocs, 33, novembre 2006.
- [3] M. Lesieur « Turbulence in Fluids », Kluwer, 1997.
- [4] Mélanges turbulents compressibles, Revue Chocs, n°37, août 2009.





COMPRENDRE  
ET PRÉVOIR  
PAR LA SIMULATION





***La simulation numérique, associée à la puissance de calcul des superordinateurs et à l'analyse mathématique, est partout : elle permet notamment de garantir la sûreté et la fiabilité des armes nucléaires.***

## COMPRENDRE ET PRÉVOIR PAR LA SIMULATION

**L**a simulation numérique, ou simulation sur ordinateur, a pris une importance considérable dans le développement des sciences de l'ingénieur. Elle assiste ce dernier pour concevoir et optimiser un objet ou un dispositif complexe. Elle permet de remplacer des expériences sur l'objet complet (par exemple, une voiture pour un crash-test), coûteuses, par des simulations, de réaliser à peu de frais des études paramétriques. Les retombées économiques sont évidentes sur les temps et les coûts de développement. Peu à peu, elle s'est donc imposée dans toutes les branches de l'industrie, en diffusant des grands groupes vers les PME.

La simulation est aussi essentielle en sciences fondamentales et appliquées, pour prédire le comportement d'objets inaccessibles, parce que trop petits, trop grands, ou trop lointains dans l'espace ou le temps. Comment comprendre le déploiement du prion, les instabilités de certaines supernovae, la formation de l'univers primordial, l'évolution du climat, sans recours à la simulation ? La simulation numérique est ainsi partout dans la recherche en astrophysique, climatologie, biologie, pour ne citer que quelques exemples.

Le fonctionnement d'une tête nucléaire repose sur des processus physiques complexes, couplant une large gamme d'échelles d'espace et de temps, engendre des conditions extrêmes de pression et de température, et ne peut plus être validé par un essai en vraie grandeur. La DAM s'appuie donc,

pour comprendre, prévoir, et garantir ce fonctionnement, sur le triptyque modélisation physique –validation expérimentale– simulation numérique. La modélisation physique et l'expérience sont abordées dans les articles « *Du microscopique au macroscopique : maîtriser et relier les échelles* » et « *Produire la matière en conditions extrêmes et la sonder* ». Nous nous focalisons maintenant sur la simulation numérique et son support, le calcul haute performance.

La simulation numérique consiste d'abord à représenter le réel avec un modèle physique décrit par des équations mathématiques, le plus souvent, à la DAM, des équations aux dérivées partielles. Pour les résoudre, il faut combiner des méthodes numériques et des méthodes informatiques. Les premières traduisent ces équations, définies sur un continuum d'espace et de temps, en un nombre fini d'équations discrètes, et les secondes permettent d'élaborer des logiciels ou codes de calcul qui les résoudront. Grâce à ces codes, on peut alors obtenir avec un ordinateur une approximation de la solution des équations.

### ≡ **Comment fonctionne une arme nucléaire ?**

Dans la première partie de l'article, nous illustrons et concrétisons notre propos sur un exemple, la simulation du fonctionnement d'une arme nucléaire, en distinguant deux phases : la première sans réactions nucléaires, la seconde avec réactions nucléaires. Nous verrons ensuite que la résolution des équations

associées demande une puissance de calcul considérable. La DAM s'est donc dotée d'importants moyens de calcul, en impulsant et en accompagnant leur évolution en coopération étroite avec l'industrie informatique nationale. Enfin, nous expliquerons comment construire des méthodes numériques approchant de manière fidèle les équations de l'hydrodynamique.

### **Une première phase décrite par les équations de l'hydrodynamique**

La première phase de fonctionnement, sans réactions nucléaires, est décrite par les équations de la mécanique des milieux continus, ou équations de l'hydrodynamique.

Ces équations relient les dérivées partielles, en temps et en espace, de la densité, de la vitesse, et de la densité d'énergie et permettent de calculer l'évolution au cours du temps de ces quantités en chaque point du milieu simulé.

Pour être digérables par l'ordinateur, ces équations continues doivent être ramenées à un ensemble fini d'équations discrètes. Pour cela, l'espace est divisé en petits secteurs, appelés mailles, le temps est fractionné en pas de temps. Les quantités à un pas de temps sont calculées explicitement en fonction de celles au pas de temps précédent. Pour ces températures assez basses, le comportement élastoplastique des matériaux, c'est-à-dire comment ils se déforment sous contraintes, doit être modélisé : c'est un des sujets traités dans l'article « *Du microscopique au macroscopique : maîtriser et relier les échelles* ».





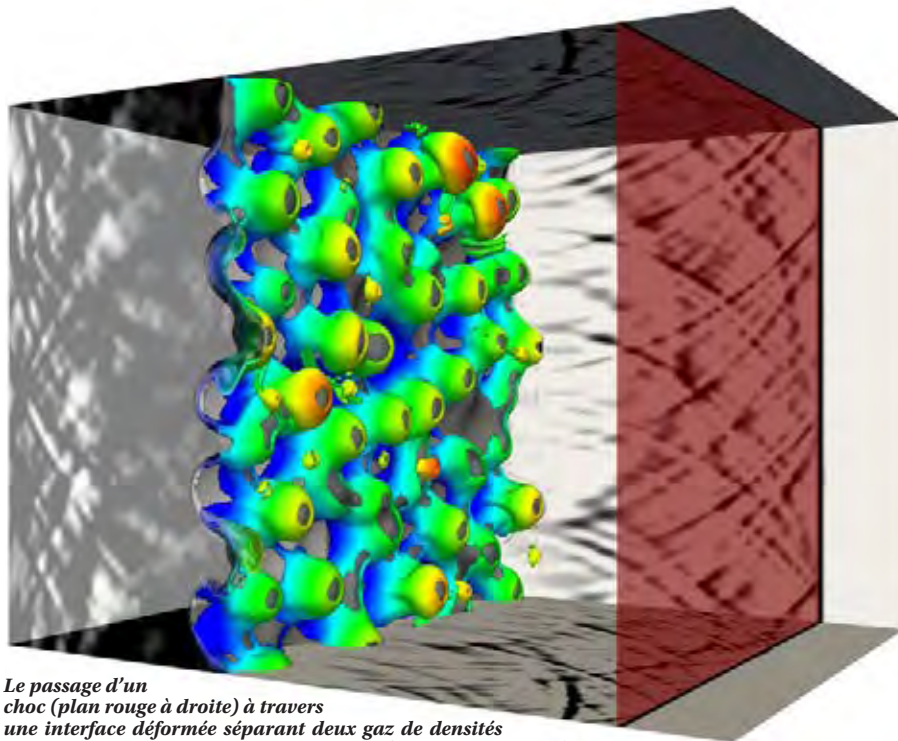
La conception de schémas numériques simulant les équations de l'hydrodynamique est un problème difficile de mathématiques appliquées, sur lequel nous reviendrons un peu plus loin.

### Une puissance de calcul astronomique est nécessaire

Le nombre d'opérations à réaliser à chaque pas de temps dépend, d'une part, du nombre de mailles, déterminé par la finesse du maillage  $h$  rapportée à la taille  $L$  du domaine simulé et de la dimension d'espace du problème résolu, et, d'autre part, de la précision des modèles physiques. Une simulation monodimensionnelle demandera  $L/h$  mailles. Pour passer en bidimensionnel, il en faudra  $(L/h)^2$ , et en tridimensionnel  $(L/h)^3$  : la puissance de calcul nécessaire est multipliée par  $L/h$  quand on change de dimension. Si par exemple  $L/h=1\ 000$ , un changement de dimension de la simulation conduira à un besoin en puissance de calcul 1 000 fois supérieur (soit une quinzaine d'années de développement des calculateurs, suivant la loi de Moore, qui prédit un doublement de la puissance de calcul en une année et demi). Il a été ainsi possible de réaliser très tôt des simulations d'hydrodynamique monodimensionnelles. Aujourd'hui, l'essentiel des simulations est effectué en 2 ou 3 dimensions. Cela requiert non seulement une énorme puissance de calcul et de stockage de données, mais aussi des capacités de visualisation spécifiques. Passons maintenant à la phase avec réactions nucléaires, qui demande de résoudre une autre catégorie d'équations.

### Phase nucléaire et équations de transport

Les réactions nucléaires produisent une population de neutrons et de particules chargées (électrons, protons, particules  $\alpha$ ), qui, en se ralentissant par interaction avec les matériaux, les portent à des températures très élevées. Les matériaux passent en conséquence à l'état de plasma, de plus en plus au fur et à mesure que la température



*Le passage d'un choc (plan rouge à droite) à travers une interface déformée séparant deux gaz de densités différentes entraîne un dépôt de vorticité (iso-surface colorée) conduisant à une amplification des perturbations initialement présentes. Entre l'interface et les ondes de choc transmises et réfléchies lors de l'interaction se révèrent des ondes acoustiques (dont la trace est visible ici sur les parois du tube à chocs). Ce mécanisme d'amplification est connu sous le nom d'instabilité de Richtmyer-Meshkov et donne lieu à l'apparition d'une zone de mélange turbulent entre les deux matériaux. Ces instabilités interviennent dans le fonctionnement d'une arme nucléaire.*

augmente. Des phénomènes nouveaux interviennent alors. La matière chaude rayonne : elle émet (et absorbe) des photons. Il faut décrire l'évolution au cours du temps de cette population de photons, pilotée par les équations dites de transport. Les populations de neutrons sont également décrites par des équations de transport. Les équations de transport sont posées dans un espace avec plus de dimensions que l'espace usuel : il faut en effet connaître, en chaque point de l'espace, dans quelles directions se propagent les photons et les neutrons (ainsi que les particules chargées), et comment ils se répartissent en énergie. En somme, deux dimensions de direction (par exemple, les deux angles d'Euler) et une dimension d'énergie s'ajoutent aux dimensions de l'espace physique. Cela se traduit en pratique par une augmentation considérable du nombre de quantités à calculer dans chaque maille. Par exemple, si la sphère des directions est divisée en une centaine de secteurs, et la répartition en énergie décrite à l'aide d'une centaine de groupes, à savoir de mailles dans la dimension énergie, nous devons calculer une dizaine de milliers de quantités dans chaque maille. La résolution des équations de transport est donc coûteuse et s'appuie sur des moyens de calcul haute performance.

### Données physiques pour la simulation

Il faut aussi mentionner que la simulation doit être alimentée par des données physiques : lois de comportement d j évoquées, équations d'état donnant la pression en fonction de la température et de la densité, opacités mesurant l'interaction du rayonnement avec la matière, sections efficaces nucléaires, mais aussi conductivités et viscosités des milieux. Le calcul de ces quantités s'appuie sur une importante activité de recherche en physique du solide, des plasmas, physique atomique et physique nucléaire, qui permet d'établir les modélisations précises et cohérentes. Mais les modèles élaborés ne peuvent être simulés qu'avec de puissants moyens de calcul. Si, par exemple, on remplace une loi de comportement semi-empirique par un modèle multi-échelle, le besoin en puissance de calcul augmente drastiquement. Parmi les travaux les plus exigeants en ressources de calcul, on citera notamment l'équation d'état du Plutonium avec traitement des électrons corrélés (voir « *Du microscopique au macroscopique : maîtriser et relier les échelles* »), ou encore la simulation de la fission dynamique 3D (voir « *Comprendre la*

structure du noyau et ses interactions pour en extraire l'énergie »).

### Le calcul haute performance, support de la simulation

La complexité des équations en présence et la précision demandée pour leur résolution nécessitent donc non seulement des méthodes numériques et informatiques spécifiques, mais également les meilleurs et les plus puissants ordinateurs du moment.

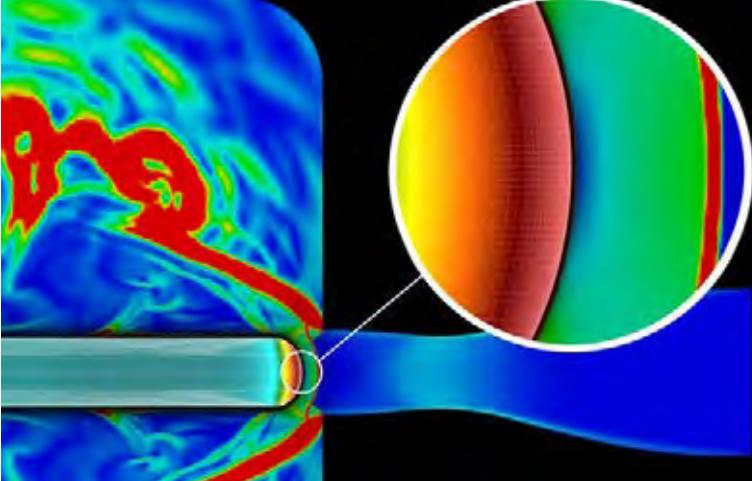
La simulation numérique est indissociable du calcul haute performance : chaque progrès incrémental dans le domaine du calcul permet à la simulation d'être plus précise. Toute avancée décisive des moyens de calcul permet à la simulation, comme nous l'avons vérifié à chaque changement de calculateur, d'aborder de nouveaux problèmes ou d'utiliser des modèles plus prédictifs pour un problème donné. La DAM a donc toujours cherché à disposer de puissants moyens de calcul, comme nous allons le voir, en passant en revue l'évolution de nos ordinateurs depuis les origines.

### L'évolution des ordinateurs à la DAM : la montée en puissance du calcul haute performance

Sur un ordinateur, la représentation d'un nombre réel s'effectue au moyen d'une arithmétique finie avec une certaine précision : le nombre est représenté par un nombre fini de bits (c'est-à-dire de 0 ou de 1)<sup>1</sup>. Par exemple, un nombre réel, en double précision, option utilisée pour la plupart de nos calculs, sera représenté sur 64 bits. Les opérations (addition, multiplication, etc.) réalisées sur ces représentations des nombres sont dites opérations flottantes. La puissance de calcul d'une machine se mesure par le nombre d'opérations flottantes qu'elle peut réaliser en une seconde, ou flops.

### L'ère des machines scalaires

La DAM a d'abord utilisé, dans les années 1960 et jusqu'au début des années 1970, des machines IBM. C'est sur ce type de machine qu'a été conçue la première arme thermonucléaire française.



*Visualisation de la simulation multiphysique multiéchelles (couplage écoulement-ablation-thermique) d'un essai au Jet de Plasma. L'écoulement haute pression est généré dans la tuyère (à droite) et vient chauffer l'éprouvette placée à gauche. La bulle illustre la finesse du maillage employé dans la zone fluide afin de capturer précisément les transferts thermiques dans la couche limite à proximité de la paroi.*

Toutes les simulations sont bien sûr monodimensionnelles, au vu de la puissance disponible (en dessous du million de flops, ou Mflops). En 1957 est fondée la société (américaine) CDC. Elle produit les premiers supercalculateurs scientifiques. En 1965, apparaît le CDC 6600.

Sa puissance de calcul est de quelques Mflops, c'est-à-dire qu'il peut réaliser quelques millions d'opérations flottantes par seconde. En 1969, le CDC 7600, successeur du 6600, propose une puissance décuplée (déjà le facteur 10...) et atteint quelques dizaines de MFlops.

Leur concepteur est le génial Seymour Cray, qui quitte CDC pour fonder sa société en 1972, et qu'on va recroiser par la suite... La DAM acquiert un CDC 6400, puis, en 1974, un CDC 6600, et enfin, en 1976, un CDC 7600. Cette excellente machine sera utilisée jusqu'au milieu des années 1980.

### L'ère des machines vectorielles

En 1975, le Cray 1 ouvre une nouvelle ère, celle de la vectorisation, qui consiste à réaliser simultanément un groupe d'opérations, sur un ensemble, appelé « vecteur » de données, ce qui démultiplie ainsi la puissance de la machine. Cadencé à 80 Mhz, le Cray 1 est un ordre de grandeur plus rapide que le CDC 7600 : les 100 Mflops sont dépassés !

Toutefois, cette performance est obtenue sous condition : il faut regrouper en paquets les opérations à réaliser pour utiliser efficacement les capacités vectorielles. En 1982, le Cray XMP lui succède. C'est en somme plusieurs (2 ou 4) Cray 1 améliorés et accélérés. Le gigaflops est (presque) atteint. La DAM disposera en 1982 du Cray 1, en 1990, du Cray XMP et du YMP qui, avec ses 8 processeurs,

atteint 2,7 GFlops, et enfin, en 1996, du T90, qui, fort de ses 24 processeurs, aligne une puissance de plusieurs dizaines de Gflops. Ces machines ont notamment permis de réaliser des simulations bidimensionnelles suffisamment résolues, et d'utiliser des modélisations précises de la matière. Mais une autre révolution se pré-

pare : celle du parallèle. La DAM l'anticipe en acquérant en 1994 un Cray T3D à 128 processeurs, puis en 1996 un Cray T3D à 256 processeurs avec une puissance crête unitaire de 0,3 GFlops par processeur, soit près de 80 GFlops.

### L'essor du calcul haute performance au profit de la simulation : le projet TERA

En 1996, date de la dernière campagne d'essais nucléaires avant leur arrêt définitif, le complexe de calcul de la DAM, composé du T90, du T3D et du T3E, aligne une puissance de calcul, considérable pour l'époque, d'une centaine de Gflops.

Mais, en cette même année, les capacités nécessaires pour garantir la sûreté et la fiabilité des armes nucléaires sans nouvel essai sont évaluées comme devant être multipliées par 10 000 en dix ans, soit bien plus que ne le permettaient les seuls progrès de la microélectronique. Il a donc fallu anticiper un changement radical de l'architecture des supercalculateurs, mais également engager un important effort dans le domaine du logiciel. Plus généralement, c'est l'ensemble du système « calculateur – centre de calcul – logiciels – applications » qui a dû évoluer dynamiquement et de concert. Dans ces domaines, la plupart des développements technologiques nécessaires ne sont pas spécifiques de la simulation du fonctionnement d'une arme nucléaire. Ils ont donc pu être menés en coopération avec des partenaires de l'industrie et de la recherche.

<sup>1</sup> 1 pour le signe, n+1 pour la mantisse, B pour l'exposant : on parle de représentation flottante.





Accroître d'un facteur 10 000 la puissance de calcul disponible était l'objectif du projet TERA entre 2000 et 2010. Conduit en trois étapes, il est au cœur de la renaissance d'une industrie française des supercalculateurs dans un contexte technologique propice de montée en puissance des microprocesseurs généralistes au détriment des processeurs vectoriels propriétaires.

La DAM, en partenariat avec Bull, constructeur français d'ordinateurs, est un des acteurs majeurs de cette renaissance.

### Le passage aux architectures massivement parallèles

La première étape a abouti à l'installation, en 2001, du supercalculateur TERA-1 composé de 2 500 microprocesseurs [1] et doté d'une capacité de calcul de 5 teraflops, soit déjà un gain d'un facteur d'environ 50. Son exploitation au sein du centre de calcul du CEA/DAM et la gestion des flux de données issus des grandes simulations numériques ont tout particulièrement mis en évidence la nécessité de maîtriser les logiciels régissant le fonctionnement du calculateur.

TERA-1 est un calculateur du constructeur américain Hewlett-Packard. Dans un souci d'indépendance nationale, la DAM contribue alors à l'émergence d'une industrie française des calculateurs, comme nous allons le voir.

La deuxième étape a conduit, en 2005, à l'installation du supercalculateur TERA-10, d'une puissance de 60 téraflops. TERA-10 est une machine du constructeur français Bull.

Elle est le résultat du retour d'expérience de l'étape précédente, avec des caractéristiques uniques : c'est le plus puissant supercalculateur qui utilise le système d'exploitation ouvert Linux et qui dispose d'un débit d'entrées/sorties vers

les systèmes de stockage de données le plus élevé au monde.

Forts de cette réalisation, le CEA et la société Bull décident alors de proposer la thématique « supercalculateur » comme l'un des axes de développement du pôle de compétitivité SYSTEM@TIC, alors en gestation en Île-de-France.

Le projet FAME2 (*Flexible Architecture for Multiple Environment*), élaboré pour développer une nouvelle brique de calcul en vue d'atteindre le petaflops, devient ainsi l'un des projets fondateurs de SYSTEM@TIC.

La machine TERA-10 a notamment permis d'augmenter encore la résolution des calculs bidimensionnels, de réaliser les premiers calculs tridimensionnels, d'améliorer la description des phénomènes aux interfaces entre matériaux. Elle a été un des éléments essentiels pour garantir la tête nucléaire aéroportée par la simulation, une première au monde.

### TERA-100 ou la confirmation du succès

La troisième étape TERA-100<sup>2</sup>, qui met en œuvre plus de 17 000 microprocesseurs, a permis de disposer, en 2010, d'une puissance de calcul de plus d'un petaflops : la puissance de calcul était donc bien, comme annoncé en 1996, 10 000 fois plus grande que les 100 Gflops disponibles en 2000, et le pari était tenu [2]. Aboutissement d'un effort de coconception entre les équipes de la société Bull et du CEA/DAM, Tera-100 marque ainsi la réussite du projet TERA. Premier supercalculateur européen à dépasser le petaflops et cinquième plus puissant au monde lors de sa mise en service, il confirme le savoir-faire de la société Bull et de ses partenaires. TERA-100 a donné naissance à une véritable ligne de produits, positionnant la société Bull, intégrée depuis au groupe ATOS, comme une sérieuse alternative européenne aux constructeurs américains et japonais.

<sup>2</sup> Nos machines portent des noms de mathématiciens. TERA-100 a ainsi été baptisé Lascaux, numéroté de renom et directeur scientifique de la DAM de 1997 à 2003

### Vers une nouvelle génération de calculateurs : de nouveaux défis...

Des outils de simulation toujours plus précis nécessiteront la mise en œuvre, au début des années 2020, de calculateurs beaucoup plus puissants que ceux de la génération TERA-100.

Cependant, l'évolution et l'architecture des calculateurs sont intimement liées aux progrès des technologies de la microélectronique.

Or la réduction de la finesse de gravure des composants s'accompagne de contraintes importantes si bien qu'il ne faut plus espérer une augmentation significative de leur fréquence de fonctionnement.

Dès lors, l'évolution de l'architecture des processeurs et la combinaison de paramètres, comme le nombre de cœurs de calcul ou celui d'instructions par cycle d'horloge, restent la source principale de



Supercalculateur TERA1000-1, installé sur le Centre CEA - DAM Île-de-France.

l'accroissement de la performance des supercalculateurs.

Corrélativement, la réduction de la consommation d'énergie proviendra tout particulièrement de la maîtrise des mouvements de données nécessaires à l'alimentation des unités de calcul.

Rapprocher la mémoire du processeur et en augmenter le débit via les technologies d'empilement 3D est devenu indispensable.

Avec ces contraintes technologiques, le calcul intensif est entré dans une ère de diversité architecturale dont les invariants sont la recherche de la localité et la mise en œuvre de toutes les sources et de tous les niveaux possibles de traitements parallèles.

Simultanément, les supercalculateurs devront mettre leur puissance de traitement au service de nouveaux usages liés à l'exploitation des volumes considérables de données, la nouvelle matière première de l'économie numérique, de l'industrie ou de la santé.

### ... et la recherche d'un nouvel équilibre au sein du supercalculateur

L'intégration de nouveaux moteurs de calcul et la convergence entre le calcul intensif et le traitement massif de données ne sont pas sans conséquence sur l'architecture générale du supercalculateur. Un nouvel équilibre doit être recherché entre les fonctions de calcul et celles qui gèrent les flux et le stockage des données dont le découplage au sein du supercalculateur paraît indispensable. Les entrées/sorties devront être assurées par un ensemble de processeurs spécialisés, appelés nœuds, qui facilitent et régulent les échanges avec les nœuds de calcul sur la base de protocoles de communication adéquats.

Plus généralement, une plus profonde hiérarchisation du système de stockage, associée à l'utilisation de nouveaux médias et contrôleurs programmables, doit permettre la distribution et l'exploitation des données en parallèle à leur produc-

tion. Enfin, ces nouvelles générations de supercalculateurs posent de nouveaux défis dans le domaine du logiciel, qu'il s'agisse de masquer à l'utilisateur la complexité de l'utilisation des ressources matérielles, de faciliter la programmation et l'atteinte des performances, mais aussi et surtout d'intégrer les nouveaux modèles d'analyse de données pour l'intelligence artificielle.

### L'avenir : les calculateurs exaflopiques

La puissance des calculateurs exaflopiques prévus à l'horizon 2020 ouvrira la voie à de nouvelles avancées ; nous n'en citerons que quelques-unes. Des lois de comportement multiéchelle (voir « *Du microscopique au macroscopique : maîtriser et relier les échelles* ») permettront une prédiction plus précise du comportement des matériaux, la fission (voir « *Comprendre la structure du noyau et ses interactions pour en extraire l'énergie* ») sera simulée plus finement, des simulations tridimensionnelles bien résolues pourront être réalisées en routine.



TERA1000-2, installé sur le Centre CEA - DAM Île-de-France.





## De la puissance de calcul au service de l'industrie et de la recherche française et européenne

Les compétences développées au centre DAM Île-de-France de Bruyères-le-Châtel dans le domaine du calcul haute performance ont été mises au service de l'industrie et de la recherche française via le Centre de calcul recherche et technologie, qui permet à une communauté de mutualiser des connaissances et des ressources de calcul. L'éventail de partenaires, académiques et industriels, et de thématiques est large. Le lecteur intéressé pourra, en visitant le site web du CCRT, s'en faire une idée. Dans le cadre du programme européen PRACE de calcul haute performance, le supercalculateur Joliot-Curie est également installé à Bruyères-le-Châtel. Une partie de Joliot-Curie est intégrée au Grand Équipement National de Calcul Intensif GENCI.

## L'analyse numérique au profit de la simulation

Nous avons vu le rôle essentiel des moyens de calcul dans la qualité de la simulation numérique, mais il ne doit pas occulter celui de l'analyse numérique, branche des mathématiques appliquées dédiée à la conception et à l'analyse des propriétés des schémas

numériques [3]. Prenons l'exemple des équations de l'hydrodynamique, essentielles, comme nous l'avons vu au début de l'article, à la simulation du fonctionnement d'une arme nucléaire. Les équations de l'hydrodynamique traduisent la conservation de la masse, de la quantité de mouvement (principe fondamental de la dynamique) et de l'énergie totale (premier principe de la thermodynamique) des matériaux composant l'arme. Ce système d'équations aux dérivées partielles est fermé par la donnée d'une équation d'état qui relie les grandeurs thermodynamiques comme la densité massique, la température, la pression, l'énergie interne et l'entropie. Sous certaines hypothèses, ce système est qualifié d'hyperbolique, c'est-à-dire qu'il possède un ensemble complet de solutions élémentaires sous la forme d'ondes se propageant avec une célérité qui dépend de l'état thermodynamique du milieu. La non linéarité de ces équations engendre l'apparition de solutions discontinues (ondes de choc) au bout d'un temps fini, et ce, même pour des données initiales régulières. Ainsi, pour la même donnée initiale, ces équations peuvent admettre au moins une solution régulière et une solution discontinue. Comment choisir la bonne ?

La réponse à cette question non triviale a été donnée par le mathématicien (contemporain) Peter Lax qui a fait le lien avec la physique et introduit la notion de solution entropique. Il s'agit de la solution physiquement admissible pour laquelle l'entropie est conservée dans les zones

régulières de l'écoulement et s'accroît au passage d'une onde de choc, conformément au second principe de la thermodynamique. Ce critère entropique discriminant assure qu'à travers un choc, l'énergie cinétique est dissipée en énergie interne. Lors du passage du continu au discret, il est essentiel de transposer ce principe de sélection entropique aux méthodes numériques construites. C'est le travail délicat de l'analyse numérique des systèmes hyperboliques non linéaires qui, au-delà du cas de l'hydrodynamique évoqué précédemment, couvre entre autres les domaines de l'aérodynamique compressible (*voir « Résister à tous les environnements »*) de la magnétohydrodynamique (arme, laser et astrophysique). La communauté des mathématiques appliquées a été et est toujours fortement mobilisée sur ce sujet ardu avec la vocation de construire des méthodes numériques robustes et précises. La DAM est un des acteurs majeurs de cette branche de l'analyse numérique, en partenariat notamment avec l'université Pierre-et-Marie-Curie, l'ENS Paris-Saclay, l'université de Bordeaux. L'ouvrage en référence<sup>3</sup>, auquel ont contribué nos équipes du centre DAM Île-de-France et du centre DAM en Nouvelle-Aquitaine (Centre CEA - Cesta), présente une synthèse du sujet, dans le cadre plus vaste des problèmes dits hyperboliques.

<sup>3</sup> R. Abgrall, S. W. Shu (Editeurs) "Handbook of numerical methods for hyperbolic problems" North-Holland, 2017



## CONCLUSION

La simulation numérique, qui s'appuie sur le calcul haute performance, est une composante essentielle pour garantir le fonctionnement sans essai des armes nucléaires, ainsi que leur sûreté. La simulation est un domaine multidisciplinaire, à la croisée des compétences en modélisation physique, analyse numérique et conception de logiciels adaptés aux machines massivement parallèles. Cette pluridisciplinarité, les évolutions rapides du domaine, sont le gage d'un travail stimulant, attractif pour les ingénieurs et les chercheurs impliqués.

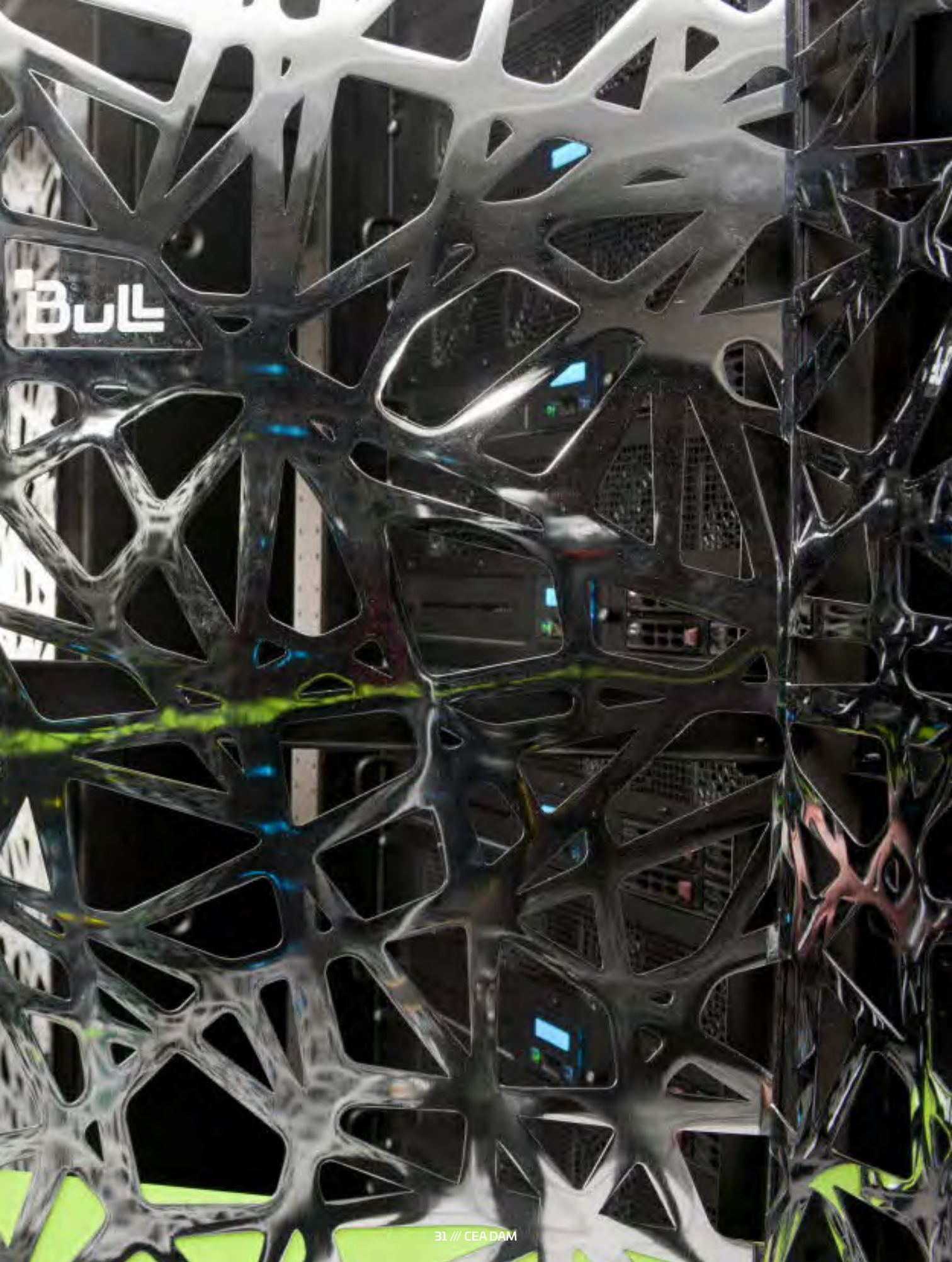
La progression volontariste des capacités de calcul a permis de se rapprocher, mais non d'atteindre, la simulation « idéale » qui intègre en même temps toute la physique nécessaire, des

méthodes numériques robustes et précises, une description la plus exacte possible de la géométrie et un maillage assez fin pour résoudre des phénomènes significatifs avec une définition suffisante.

La DAM continue donc à investir dans ce domaine, pour aller vers des simulations encore plus précises et qui intègrent davantage de processus physiques. Elle est largement ouverte, via le CCRT, à la recherche et à l'industrie, contribue à l'essor de l'industrie française du calcul haute performance, et soutient l'effort de calcul au niveau européen en exploitant une machine PRACE.

### Références

- [1] TERA, Revue Chocs, n°28, octobre 2003.
- [2] Calcul haute performance, Revue Chocs, n°41, janvier 2012.
- [3] Mathématiques appliquées, Revue Chocs, n°39, janvier 2011.



BULL

The background features a complex, abstract pattern of glowing blue and white lines and shapes, resembling a network or a fractal structure, set against a dark, almost black background. The patterns are more concentrated in the lower half of the image, creating a sense of depth and movement.

PRODUIRE LA MATIÈRE  
EN CONDITIONS EXTRÊMES  
**et la sonder**





***Une arme nucléaire dégage des quantités colossales d'énergie, confinées, dans la première phase de son fonctionnement, dans un volume relativement restreint. La matière constitutive de l'arme atteint ainsi des conditions de densité, de température, et donc de pression, extrêmes. Pour garantir le fonctionnement de l'arme, nous devons prévoir avec fiabilité et précision le comportement de la matière dans ces conditions. Pour cela, nous utilisons bien entendu la modélisation physique et des moyens de simulation numérique très performants. Mais pour que cette approche théorique soient de plus en plus robuste et précise, il faut la valider par des expériences dédiées. Porter la matière à de telles conditions en laboratoire et la sonder représente un défi.***

## PRODUIRE LA MATIÈRE EN CONDITIONS EXTRÊMES ET LA SONDER

**L**es conditions extrêmes de température et de pression rencontrées dans une arme nucléaire se retrouvent dans l'Univers, par exemple au centre des étoiles, où le confinement gravitationnel comprime même l'hydrogène à des densités bien supérieures à celles des métaux les plus denses. Mais reproduire en laboratoire des conditions approchantes est une gageure. En effet, porter la matière à très haute densité est difficile : les solides et des liquides sont à juste titre perçus comme presque incompressibles.

D'abord, voyons pourquoi il est difficile de comprimer la matière, en expliquant les fondements physiques de la notion familière de pression. Pour familiariser le lecteur avec les échelles de pression peu usuelles recherchées, nous le convierons à une visite guidée des pressions atteintes dans l'univers, en passant notamment par le centre de la terre. Puis nous décrirons la constante évolution au cours des soixante dernières années des moyens expérimentaux de génération de pression qui ont permis de gagner plusieurs ordres de grandeur dans les pressions maximales obtenues.

Nous décrirons comment le changement des propriétés électroniques des atomes sous des millions de fois la pression atmosphérique permet de stabi-

liser de nouveaux matériaux avec des propriétés remarquables. Nous verrons comment pressions et températures extrêmes sont liées et présenterons brièvement la matière à très haute température.

Mais obtenir de la matière dense, et éventuellement chaude, n'est pas suffisant pour comprendre son comportement. Il faut aussi être capable de voir ce qui s'y passe à différentes échelles, autrement dit de la sonder. Nous verrons que des progrès spectaculaires ont été faits dans la finesse des mesures pouvant être effectuées sous très hautes pressions, et ce, grâce à l'utilisation des grandes installations comme la radiographie EPURE, le Laser MJ, les synchrotrons ESRF et SOLEIL.

### **/// Pourquoi la matière résiste-t-elle à la compression ?**

Pour comprendre plus précisément ce qui se passe quand on comprime la matière, il est nécessaire de faire appel à une notion simple, mais essentielle, de mécanique quantique : pour confiner un électron dans un volume, il faut dépenser une certaine quantité d'énergie. Une manière simple de quantifier cet effet est de partir du principe d'incertitude de Heisenberg, qui minore le produit  $\Delta x \Delta p$

des écarts type sur la position  $x$  et la quantité de mouvement  $p$  d'une particule :  $\Delta x \Delta p > h/2\pi$ , où  $h$  est la constante de Planck. Quand on confine une particule dans un volume de dimension caractéristique  $\Delta x$ , son énergie cinétique moyenne  $(\Delta p)^2/2m$  doit donc être supérieure à  $h^2/8\pi^2m(\Delta x)^2$ . Une particule est d'autant plus difficile à confiner que sa masse  $m$  est petite.

Ce principe permet d'estimer l'ordre de grandeur du rayon  $r^B$  (dit rayon de Bohr) de l'atome d'hydrogène. L'énergie potentielle de l'électron est d'autant plus faible qu'il est près du noyau, c'est-à-dire que  $r^B$  est petit, mais son énergie cinétique augmente au contraire avec  $r^B$ . Le rayon de Bohr est la valeur du rayon qui minimise l'énergie totale. L'atome d'hydrogène a ainsi un rayon d'équilibre de l'ordre du demi-angström.

Quand on cherche à réduire le volume de la matière, les électrons sont de plus en plus confinés et leur énergie cinétique augmente. Cette augmentation d'énergie associée à la diminution du volume est, pour les solides et les liquides, l'origine de la force de pression qu'il faut exercer pour les comprimer. La pression est définie plus précisément comme l'opposé de la dérivée de l'énergie par rapport au volume. C'est donc le quotient d'une énergie par un volume : elle s'exprime en joule par  $m^3$ .





## Quelques ordres de grandeur de pression

La figure 1 donne quelques ordres de grandeur de pression sur Terre et dans l'Univers. L'unité de pression du système international est le pascal (joule par m<sup>3</sup> ou Newton par m<sup>2</sup>), mais l'unité la plus familière est le bar (kg-force par cm<sup>2</sup>), soit environ 10<sup>5</sup> Pascal, soit la pression atmosphérique. Quand on s'enfonce de 10 mètres sous l'eau, la pression croît d'un bar et atteint ainsi environ 1 000 bars, soit 0,1 GPa, dans les fosses océaniques les plus profondes. Pour fabriquer des diamants, il faut appliquer une pression 100 fois plus élevée, soit 0,1 Mbars ou 10 GPa. Au centre de la Terre, la pression (qui n'est pas connue avec précision) est encore de plusieurs ordres de grandeur plus élevée. Elle vaut environ 370 GPa, soit 3,7 Mbars. Nous verrons qu'elle est aujourd'hui atteignable en laboratoire, grâce à des dispositifs à base d'enclumes diamant. Au centre de Jupiter, planète géante gazeuse, la pression est environ 10 fois plus grande. Enfin, au centre du Soleil, elle est de quelques Gbars. Pour nos applications, il faut être capable de prévoir le comportement de la matière dans toute cette gamme de pression, soit au moins jusqu'au Gbar. Voyons comment cela est possible.

## La quête des hautes pressions

Comprimer la matière, c'est lui fournir de l'énergie. Deux paramètres sont ici importants : le temps de confinement et le volume de l'échantillon. Deux approches optimisent chacun de ces deux paramètres. Dans la méthode de compression statique, on transforme à l'aide d'une presse équipée d'enclumes une force appliquée en une pression sur l'échantillon. Le rapport des surfaces et la forme des enclumes permettent d'optimiser la pression et le volume de l'échantillon. Le temps de confinement peut ainsi être très long, mais le volume de l'échantillon décroît quasi exponentiellement en fonction de la pression maximale à atteindre.

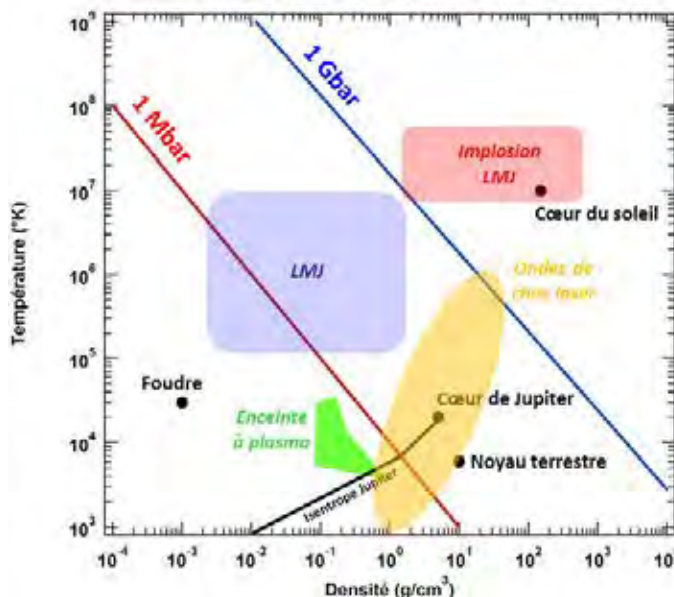


Figure 1 : Quelques ordres de grandeur de pression sur Terre et dans l'Univers.

Dans la méthode de compression dynamique, on dépose très rapidement de l'énergie sur l'échantillon. Cela provoque une perturbation supersonique de l'échantillon qui se traduit par la propagation d'une onde de choc<sup>1</sup>. Il n'y a pas de limite sur le volume de l'échantillon si on peut déposer suffisamment d'énergie.

La DAM est un des organismes moteurs de la recherche sur la matière à haute pression, tant pour la conception et l'interprétation d'expériences que pour la conception de dispositifs expérimentaux toujours plus performants.

### Les dispositifs statiques

Dans les systèmes à enclumes, l'idée est de comprimer la matière dans un petit volume entre les parois d'enclumes mobiles. La force appliquée en face arrière des enclumes, sur une surface relativement grande, est transmise à une surface plus faible, ce qui démultiplie la pression. Les systèmes peuvent être à enclumes multiples, avec des chambres d'expériences tétraédriques, cubiques ou octaédriques, ou à enclumes opposées. Comme les enclumes sont en compression, il est possible d'utiliser des matériaux très durs, comme le carbure de tungstène. Les systèmes multi-enclumes atteignent quelques dizaines de GPa et ont été utilisés dès le milieu du XX<sup>e</sup> siècle pour fabriquer des diamants de synthèse.

Il y a soixante ans, le concept d'une presse révolutionnaire est proposé : la presse à enclumes de diamant (ou Cellule à Enclumes Diamant, CED) (Figure 2).

Elle est constituée de deux enclumes de diamant venant comprimer une feuille

de métal percée d'un trou pour former la chambre expérimentale. Le diamant étant le matériau le plus dur, les pressions statiques maximales deviennent accessibles.

Les CED ont été optimisées au plus haut point et permettent d'atteindre aujourd'hui 600 GPa, soit 6 Mbars, donc de dépasser la pression au centre de la Terre. Un autre avantage du diamant est sa transparence qui permet d'observer visuellement le matériau sous pression et d'adapter toutes les mesures de spectroscopies permettant de caractériser finement un échantillon à pression ambiante. La communauté des chercheurs dans ce domaine a pu démontrer qu'une caractérisation des matériaux comprimés à plusieurs Mbars dans une CED pouvait être aussi fine et complète que pour un matériau à pression ambiante : la position des atomes, leurs mouvements collectifs et la distribution électronique deviennent visibles.

### Les dispositifs dynamiques

On peut également utiliser des dispositifs dynamiques, en acceptant de travailler à des temps de confinement courts, pour gagner quelques ordres de grandeur sur les pressions accessibles. Les deux types de systèmes, statiques et dynamiques, sont complémentaires : en statique, la température est contrôlée jusqu'à quelques milliers de degrés, alors qu'en dynamique, elle est plus élevée et augmente avec la pression.

<sup>1</sup> Une onde de choc est une discontinuité thermodynamique qui se propage dans la matière en la comprimant.

Parmi les dispositifs dynamiques, on distinguera les dispositifs à ondes de chocs et les lasers de puissance.

Le principe des premiers repose sur le fait qu'une onde de choc comprime et chauffe la matière. Elle peut être produite à l'aide d'explosifs, directement ou en propulsant des projectiles que l'on envoie sur des cibles : l'impact produit une onde de choc. Les projectiles peuvent être aussi accélérés dans des canons à gaz ou électriquement. Plusieurs projectiles, de masse décroissante, peuvent être ainsi accélérés par impacts successifs à des vitesses croissantes. Pour une vitesse de 1 km/s et une densité de  $10^4 \text{ kg/m}^3$ , on obtient des énergies spécifiques, donc des pressions, de l'ordre de 10 GPa. Avec une vitesse de 10 km/s, on s'approche du TPa, soit 10 Mbars. En pratique, on ne dépasse guère quelques dizaines de Mbars. Ces dispositifs ont quand même un intérêt, car les volumes mis en condition sont importants. Pour obtenir des pressions plus élevées, il faut un instrument capable de concentrer encore plus l'énergie. Une des solutions les plus efficaces est le laser de puissance. Lorsqu'on irradie une cible solide avec un ou plusieurs faisceaux lasers de puissance, l'interaction entre ces derniers et le solide conduit à une ionisation rapide de la surface : un plasma chaud est créé, dans lequel les faisceaux se propagent et déposent leur

énergie, ce qui entraîne une détente du plasma (c'est-à-dire que son volume augmente) dans le vide. Comme la quantité de mouvement est conservée, une pression (dite d'ablation) s'exerce et une onde de choc se propage vers l'intérieur de la cible, la comprimant et la chauffant. La réalisation d'expériences de ce type, toujours plus précises, est maintenant permise grâce à des installations laser qui possèdent un nombre sans cesse accru de faisceaux laser et une énergie laser croissante.

Ainsi, entre l'installation PHEBUS, opérationnelle jusqu'à la fin des années 1990 à la DAM, et le laser Mégajoule, le gain en énergie délivrée est de près de 300. Le laser Mégajoule (LMJ), dont la conception a mobilisé les équipes de la DAM, est installé sur le site du Centre CEA - Cesta (Figure 3). Il est conçu pour focaliser l'énergie de 176 faisceaux laser sur une cible de quelques millimètres, concentrant sur une dizaine de  $\text{mm}^3$  ( $10^{-8} \text{ m}^3$ ) une énergie de l'ordre du mégajoule ( $10^6 \text{ J}$ ). On obtient ainsi des densités d'énergie de  $10^{14} \text{ J/m}^3$ , donc une pression de l'ordre du Gbar, gagnant des ordres de grandeur par rapport aux autres moyens expérimentaux. Les lasers ne sont pas seulement capables de produire des pressions importantes. Ils permettent aussi d'atteindre des températures très élevées : la centaine de millions de degrés est accessible avec le LMJ. On peut ainsi étudier la

matière à haute température, ou plus généralement à haute densité d'énergie. Mais le LMJ permettra d'aller vers des densités d'énergie encore plus élevées grâce à l'ignition. L'ignition est la combustion par réaction de fusion thermonucléaire d'un mélange d'isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium. Ce mélange est suffisamment comprimé et chauffé grâce au laser pour que les premières réactions de fusion se déclenchent en son centre. Le « point chaud » central ainsi créé joue le rôle d'une allumette qui déclenche la propagation de la réaction thermonucléaire à l'ensemble du mélange. L'atteinte de l'ignition permettra d'obtenir, au voisinage du point chaud, des pressions de plusieurs Gbars, associées à des températures de l'ordre du milliard de degrés. Atteindre des très hautes pressions, et plus généralement, des hautes densités d'énergie, demande donc des moyens importants. La DAM dispose d'une large palette de dispositifs qui permettent d'étudier la matière dans ces conditions, ce qui lui permet de répondre à ses besoins de validation, mais aussi d'être un des leaders de la recherche dans ce domaine. Passons maintenant en revue quelques retombées de cette activité, tant pour la recherche sur la compréhension de la structure et des propriétés de la matière que pour les applications industrielles.



Figure 2. Cellule à enclume diamant (CED)

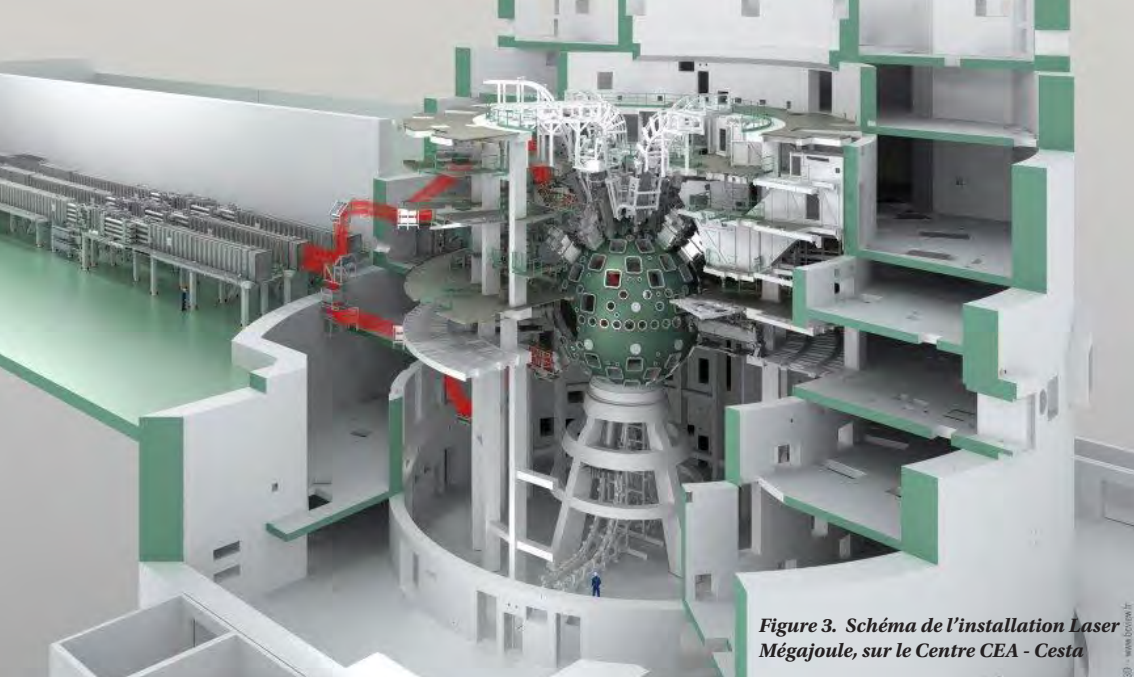


Figure 3. Schéma de l'installation Laser Mégajoule, sur le Centre CEA - Cesta

Tout ceci fait encore débat, mais la communauté scientifique a salué ce résultat comme une avancée dans la quête de supraconducteurs à température ambiante.

Les équipes de la DAM sont un des acteurs majeurs de la recherche sur l'hydrogène et plus généralement sur les hydrures d'éléments légers à haute pression.

## Les applications des hautes pressions et des hautes températures

### Hautes pressions et physique de la matière

Les hautes pressions ont ouvert un pan entier de la physique de la matière, avec, comme nous allons le voir, des effets qui n'étaient pas forcément attendus.

Le premier d'entre eux est une « revisite » du tableau de Mendeleiev. Avec la pression, le volume par atome diminue. Un premier effet est que les atomes devraient adopter des structures solides compactes, c'est-à-dire qui optimisent le taux de remplissage de l'espace. Un autre effet est que les électrons devraient avoir tendance à se délocaliser, jusqu'à être mis en commun entre tous les atomes, comme dans les métaux. En résumé, on s'attendrait à ce que la pression transforme tous les matériaux en métaux qui auraient des structures simples compactes. Mais les études de ces vingt dernières années avec des mesures très fines dans le domaine du million d'atmosphères ont révélé une réalité bien plus surprenante : des structures complexes sont observées, comme celles de l'hydrogène (Figure 3), et des métaux simples comme le lithium deviennent des isolants sous pression. La pression semble même transformer la simplicité en complexité !

Autre conséquence de ces recherches : l'obtention possible de nouveaux supraconducteurs. Par exemple, l'hydrogène, élément le plus simple, est composé d'un proton et d'un électron.

À pression ambiante, l'hydrogène moléculaire, associant deux atomes via une liaison covalente, est gazeux. Quand on le comprime à quelques centaines de bars, par exemple pour remplir le réservoir d'un véhicule à hydrogène, il se transforme en un liquide isolant. C'est le physicien du solide Neil Ashcroft qui a annoncé, dans les années 1960, la métallisation sous très haute pression de l'hydrogène. L'hydrogène métallique devrait être supraconducteur, à savoir conduire le courant électrique sans aucune déperdition d'énergie par effet Joule, contrairement aux conducteurs ordinaires. De plus, la température (dite critique) en dessous de laquelle il resterait supraconducteur serait de l'ordre de 20° C, bien supérieure à celle de tous les supraconducteurs connus. La pression de métallisation, estimée initialement à quelques dizaines de GPa, n'est à ce jour pas encore connue : les annonces récentes de métallisation autour de 500 GPa ont été infirmées.

Le sujet reste donc ouvert, et la quête se poursuit. Mais d'autres supraconducteurs ont été produits à haute pression. Le record de température critique est ainsi détenu par le sulfure d'hydrogène : il devient supraconducteur en dessous de -70° C, à une pression de 1,5 Mbars, comme montré en 2015 par une équipe de l'Institut Max Planck. Quelle est l'origine physique de la supraconduction observée ? S'agit-il ou non d'un mécanisme de type BCS<sup>2</sup> ?

<sup>2</sup> BCS pour Bardeen, Cooper, Schrieffer, théorie de la supraconductivité proposée en 1957.

Elles ont ainsi mis en évidence que la pression permet d'enrichir ces composés en hydrogène : dans le cas des hydrures de fer, on obtient ainsi successivement des composés FeH, FeH<sub>2</sub>, FeH<sub>3</sub>..., jusqu'au FeH<sub>5</sub>, ce dernier ayant récemment été mis en évidence à la DAM. Ces matériaux sont de potentiels supraconducteurs à haute température.

Une autre application concerne les conditions de vie sur les exoplanètes. De nombreuses exoplanètes ont et continuent à être découvertes, mais la possibilité de vie à leur surface dépend de multiples conditions. La plus évidente est qu'il y règne une température acceptable, mais il faut aussi, que, comme sur la Terre, un champ magnétique suffisant la protège des flux de particules énergétiques en provenance du cosmos.

Toutefois, comme ce champ magnétique est produit par les mouvements de convection de la partie liquide du noyau, il ne peut exister que si une partie de ce noyau reste liquide. Pour prévoir avec fiabilité l'état, solide ou liquide, de ce noyau, il faut déterminer avec précision la courbe de fusion, en fonction de la pression et de la température.

La DAM a récemment été impliquée dans un projet de l'Agence nationale de la recherche, qui a permis de faire progresser la connaissance sur ce sujet, en associant simulations de dynamique moléculaire et expériences pour déterminer avec précision la courbe de fusion du fer, pur ou allié à d'autres éléments.



Figure 4. Machine de radiographie éclair de l'installation Epure, sur le Centre CEA - Valduc.

### La matière à haute densité d'énergie

L'étude des plasmas denses et chauds intéresse la communauté académique, et tout particulièrement la communauté astrophysique, qui voit avec les lasers de puissance tels que le LMJ, la possibilité de progresser dans nombre de domaines, dont l'ingrédient commun est la nécessité de bien connaître l'équation d'état de la matière, ainsi que son opacité<sup>3</sup>. Présentons quelques exemples.

Le cœur des étoiles (dont notre Soleil) est le siège d'intenses champs magnétiques dont les lignes peuvent se réorganiser (on parle de reconnexion magnétique). L'énergie magnétique est partiellement convertie en énergie cinétique, avec émission de particules énergétiques et dégâts possibles sur les systèmes électriques de notre planète.

Le Soleil est également agité par des oscillations très basses fréquences, observées par les héliosismologues, qui permettent de remonter à la structure interne de l'astre.

La précision des modèles de matière est essentielle pour bien prévoir les observations, et en retour, la confrontation entre calculs et observations permet de contraindre les modèles de matière. Ainsi, l'étude de la matière à haute densité d'énergie progresse simultanément dans deux directions : l'étude de nouveaux régimes thermodynamiques (avec des pressions et des températures toujours plus élevées) et la réalisation de mesures précises qui contraignent plus efficacement les modèles théoriques.

### Quelques applications industrielles des hautes pressions

Une des premières applications industrielles des hautes pressions a été la synthèse de l'ammoniac, processus industriel de première importance pour l'industrie chimique.

Un autre procédé industriel d'intérêt est la fabrication de diamants de synthèse, qui permet de pallier la rareté des diamants naturels. Ils sont utilisés dans l'industrie pour leur dureté exceptionnelle (en tant qu'outils de coupe), pour leur conductivité thermique bien supérieure à celle des métaux (pour les systèmes de refroidissement), mais aussi pour les enclumes diamant décrites plus haut, et bien sûr en joaillerie.

De nouveaux matériaux sont synthétisés dans les laboratoires ; certains restent en l'état après retour à pression ambiante et peuvent présenter un intérêt industriel.

Ainsi, ont par exemple été synthétisés de nouveaux matériaux ultra-durs. Gageons que, guidés par la simulation, les physiciens des hautes pressions continueront à produire de nouveaux matériaux, avec, comme applications prospectives, des ultra-durs complémentaires du diamant, de nouveaux propérgols à très haute densité d'énergie pour les voyages spatiaux au long cours, ou peut-être même, comme évoqué plus haut, des supraconducteurs à température ambiante.

### ≡ Sonder la matière dense

Nous avons vu comment produire de la matière dense. Mais encore faut-il être capable de visualiser ses déformations et sa structure. Comme, dans tous les dispositifs évoqués, la matière est confinée, elle n'est pas directement visible. Il faut donc une lumière plus pénétrante que la lumière visible : les rayons X, utilisés pour la radiographie médicale.

Mais il faut pouvoir sonder des objets en mouvement très rapide (quelques kilomètres par seconde), et de densité extrêmement élevée, donc nous avons besoin d'instruments spécifiques capables de produire des flashes de rayons X brefs et intenses : c'est ce qui est fait dans Epure. Dans le LMJ, l'expérience elle-même produit des rayons X utilisés pour générer les images.

### L'installation Epure

L'installation Epure sert à étudier la phase initiale de fonctionnement d'une arme nucléaire (Figure 4). C'est une machine de radiographie éclair, capable de délivrer en des temps très courts de fortes doses de rayons X : le but est de radiographier un objet dense, confiné dans une enceinte.

<sup>3</sup> L'opacité mesure la propension de la matière à absorber la lumière.





Epure, installée au Centre CEA - Valduc, et réalisée en coopération avec le Royaume-Uni, dispose actuellement d'un seul axe, mais en comportera à terme trois. Il sera ainsi possible de réaliser trois « instantanés » de l'objet radiographié, à des instants et avec des angles de vue différents.

Le flash de rayons X de l'axe actuel est produit en faisant interagir un faisceau d'électrons très énergétiques avec une cible métallique : c'est le rayonnement, dit de freinage, des électrons déviés par les ions métalliques, qui va générer les rayons X.

Pour obtenir des images de bonne qualité, il faut en plus que la zone d'émission des rayons X soit la plus petite possible, ce qui demande une bonne maîtrise du faisceau et de son interaction avec la cible. L'optimisation du faisceau est réalisée en s'appuyant sur des simulations numériques précises de sa propagation et de son interaction avec la cible. Les physiciens des accélérateurs de la DAM ont réussi, en associant ces simulations détaillées du faisceau à des mesures précises sur la machine, à obtenir une tache focale de très petite dimension. La qualité exceptionnelle des images obtenues, couplée à des méthodes pointues d'analyse, est un ingrédient indispensable à la validation de nos outils de simulation.

### Le LMJ et l'imagerie X

Comme vu précédemment, le LMJ permet de porter la matière dans des conditions extrêmes de densité et de température. Dans ces conditions, elle émet des rayons X, qui peuvent être utilisés pour produire des images de l'expérience. Mais les problèmes technologiques à résoudre sont délicats.

D'une part, il faut une image précise d'objets millimétriques, avec des détails très fins, donc une très haute résolution, au moins de l'ordre de la dizaine de microns.

Nous avons étudié plusieurs techniques à la DAM, dont les optiques X à miroirs, qui ont permis de concevoir et de réaliser de véritables microscopes imageurs, avec des résolutions inférieures à 5 microns.

D'autre part, les temps d'émission sont très courts (de l'ordre de la nanoseconde), ce qui exige une très haute résolution temporelle et une synchronisation précise. Il a fallu développer des systèmes de distribution des signaux de déclenchement très performants en stabilité et en précision. Enfin, les rayons X pénètrent dans les métaux.

Les équipes de la DAM, en collaboration avec l'Institut d'Optique, ont conçu des miroirs spéciaux avec des réflectivités suffisamment uniformes sur une large bande de fréquence.

### Les synchrotrons, ESRF et Soleil

La mesure de l'organisation des atomes sous très haute pression est possible avec les installations de type synchrotron qui permettent la production de faisceaux X très brillants et de très petits diamètres. Toute une communauté académique utilise massivement les synchrotrons depuis ces vingt dernières années.

Elle a ainsi montré qu'une caractérisation des matériaux comprimés dans une CED sous une pression du million d'atmosphères pouvait être aussi fine et complète que pour un matériau à pression ambiante : la position des atomes, leurs mouvements collectifs et la distribution électronique sont observables. Il est maintenant même possible de produire des chocs et d'accéder à la dynamique des transitions de phase qu'ils engendrent avec des précisions inégalées.

Ces expériences bénéficient en même temps des techniques de diagnostic éprouvées des synchrotrons et des pressions très élevées accessibles par chocs. Les équipes de la DAM ont fortement participé à cet effort.

En particulier, sur le synchrotron Soleil, implanté sur le plateau de Saclay, la ligne Mars est dédiée à l'étude des actinides.



## CONCLUSION

L'étude, théorique et expérimentale, de la matière en conditions extrêmes, essentielle à la compréhension du fonctionnement des armes nucléaires, est au carrefour de plusieurs branches de la science physique de la matière, astrophysique et de la technologie : conception de dispositifs pour la mettre en condition, de l'enclume diamant au laser de puissance, conception et simulation d'expériences et de diagnostics pour l'observer.

Ce domaine est attractif de par son intérêt pour les sciences fondamentales, de par les technologies de pointe qu'il utilise et développe, et de par ses applications.

Il devrait encore progresser grâce aux nouveaux moyens expérimentaux, dont le LMJ, et la montée en puissance des simulations associées, et pourrait donner lieu à de nouvelles percées en physique fondamentale et appliquée.

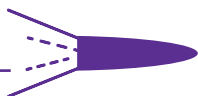


The background is a deep purple color with a subtle grid pattern. Several bright white, glowing lines curve across the frame, creating a sense of depth and movement. The lines appear to be part of a larger, curved structure, possibly a tunnel or a futuristic architectural element. The overall effect is dynamic and modern.

RÉSISTER

À TOUS LES ENVIRONNEMENTS





**Durant sa trajectoire, la tête nucléaire doit résister à des environnements particulièrement hostiles, qu'il s'agisse des sollicitations extrêmes imposées par les conditions de vol ou des effets des agressions des défenses adverses. Pour garantir son fonctionnement, il faut protéger la charge nucléaire et les équipements internes de toutes ces menaces. Nous allons voir comment y parvenir par une conception adéquate de toutes les parties de la tête.**

## RÉSISTER À TOUS LES ENVIRONNEMENTS

**U**n sous-marin nucléaire lanceur d'engins assure le lancement des missiles intercontinentaux qui mettent à poste les têtes nucléaires, sur une trajectoire décidée par le Président de la République. La tête nucléaire doit faire face, sur cette trajectoire, à un environnement doublement hostile.

D'une part, elle subit les contraintes mécaniques et thermiques sévères de l'ensemble des phases successives d'un vol spatial, du lancement au retour dans l'atmosphère. De sorte que la tête est soumise à des sollicitations physiques variées de forte intensité : accélérations, excitations mécaniques, flux thermiques.

D'autre part, les défenses adverses vont mettre en œuvre tous les moyens pour l'intercepter et la détruire, ou au moins l'empêcher de fonctionner : missiles antibalistiques, armes à énergie dirigée par exemple.

Les sollicitations physiques sont là aussi variées et extrêmes : effet de souffle et fortes doses de rayonnements ionisants, champs électromagnétiques de haute intensité. Comme expliqué dans l'article « *Rendre les objets invisibles* », tout est mis en œuvre pour que la tête ne soit pas détectée, mais il faut malgré tout la protéger de ces agressions potentielles.

Nous allons voir comment est conçue la tête nucléaire pour résister à ces environnements et survivre aux agressions.

### Une mission sous fortes sollicitations

Lors de sa mission, une tête nucléaire doit supporter des sollicitations très sévères. En premier lieu, le lancement du missile impose d'énormes accélérations et des vibrations intenses. La tête suit ensuite une trajectoire balistique, à plusieurs milliers de kilomètres d'altitude, puis rentre dans l'atmosphère avec une vitesse de plusieurs dizaines de fois la vitesse du son. L'écoulement à très grande vitesse de l'air autour de la tête va induire, dès que l'atmosphère devient suffisamment dense, soit à quelques dizaines de kilomètres d'altitude, des forces aérodynamiques considérables, génératrices de contraintes et de vibrations. La dissipation d'énergie cinétique en chaleur par la viscosité de l'air

génère d'importants flux thermiques, qui portent la paroi de la tête à plusieurs milliers de degrés.

Pour résister à de telles conditions, il faut d'abord les connaître, donc prévoir avec précision et fiabilité l'écoulement autour de la tête et les températures induites. Écoulement aérodynamique et transfert de chaleur interagissent l'un sur l'autre à la paroi : il s'agit donc de résoudre simultanément les équations de l'aérodynamique et celles de la thermique.

### Un écoulement complexe

Focalisons-nous sur l'écoulement à basse altitude, le plus sollicitant, et voyons sur la figure 1 comment s'organise l'écoulement hypersonique autour du « corps de rentrée » de la tête nucléaire (qui correspond à l'enveloppe externe de l'objet).

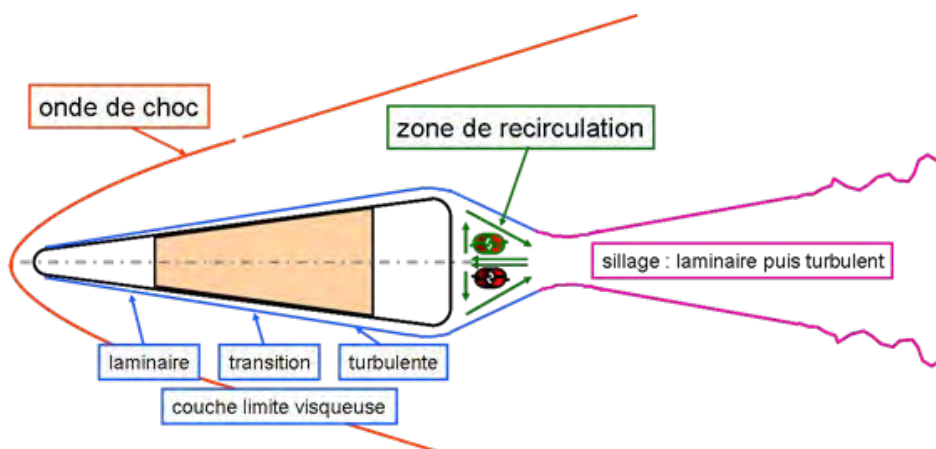
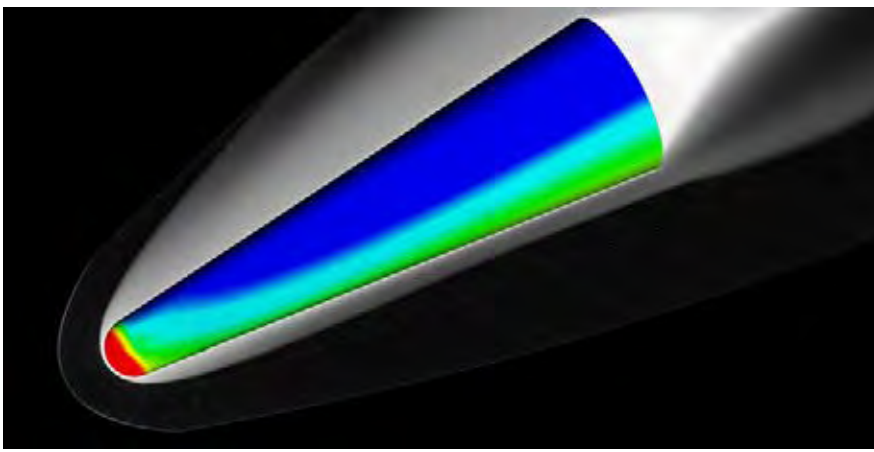


Figure 1 : Représentation schématique de l'écoulement autour d'un corps de rentrée dans l'atmosphère





**Figure 2 : Visualisation de l'écoulement stationnaire hypersonique 3D (Mach 10) autour d'un cône en incidence. On observe l'onde de choc détachée à l'avant et la trace du champ de pression à la paroi maximale au niveau du point d'arrêt.**

L'air est assez dense pour qu'on le considère non comme un ensemble de molécules, mais comme un milieu continu<sup>1</sup>.

À ces vitesses extrêmes, un choc – une surface de discontinuité de la pression, de la densité et de la température – entoure l'objet (Figure 2). Au passage de ce choc, la pression et la densité augmentent fortement et une partie de l'énergie cinétique de l'écoulement est convertie en chaleur. Les molécules d'air, portées à plusieurs milliers de degrés, se dissocient et se recombinaient. Il faut prendre en compte cette chimie complexe pour décrire finement la thermodynamique de l'écoulement. Rapprochons-nous maintenant de l'objet. Au voisinage de la paroi, une couche limite apparaît. C'est une zone de très faible épaisseur où sont confinées les variations de contraintes visqueuses et de température. La couche limite est le lieu du transfert d'énergie de l'écoulement vers la paroi. La présence du choc et de la couche-limite de paroi, ainsi que les réactions chimiques, rendent particulièrement délicate la résolution numérique de l'écoulement.

Elle nécessite des méthodes robustes et précises qui reposent sur l'étude des systèmes hyperboliques (voir « *Comprendre et prévoir par la simulation* »). De surcroît, le nombre de Reynolds (voir « *Du microscopique au macroscopique : maîtriser et relier les échelles* ») varie avec l'altitude, si bien que l'écoulement, d'abord laminaire à haute altitude, devient turbulent.

### Un écoulement de transition

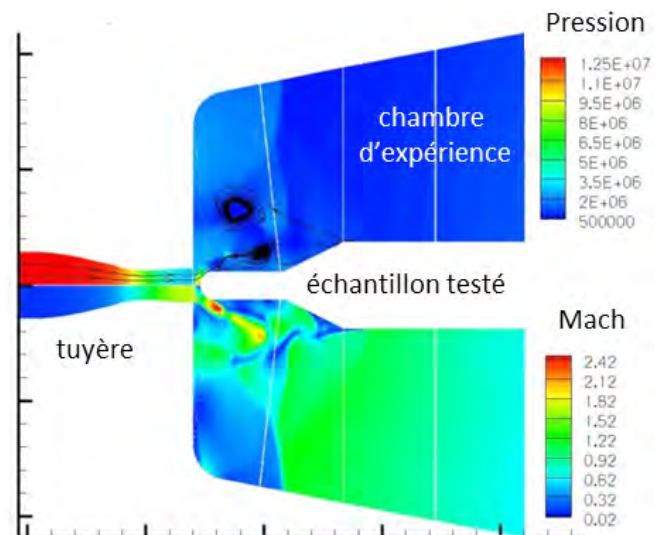
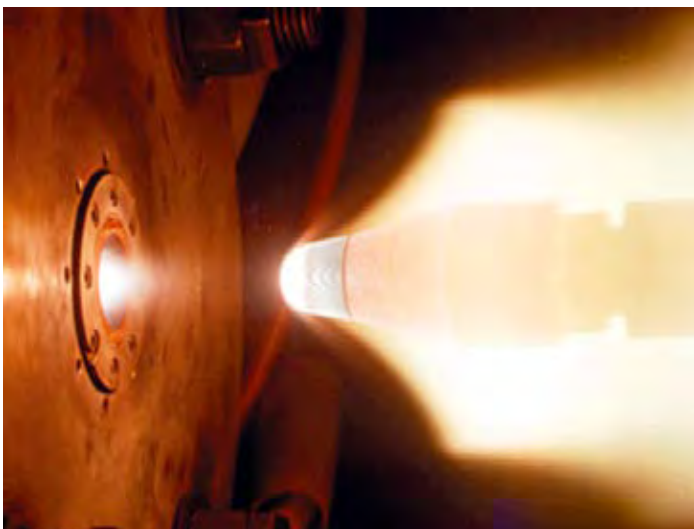
Il faut donc traiter le délicat problème de la transition à la turbulence, qui dépend non seulement de l'écoulement, mais aussi de l'état de surface de la paroi de l'objet. Les critères de transition actuels reposent essentiellement sur des corrélations expérimentales et sont ajustés au moyen d'essais en soufflerie et d'essais en vol. Mais les équipes du Centre CEA - Cesta, en collaboration avec l'Institut de mécanique des fluides Von Karman et l'ONERA, travaillent à réduire la part d'empirisme associée à ces critères. Des travaux sont menés afin de mettre au point par la simulation des critères fondés sur la physique de la transition, c'est-à-dire

résultant d'une analyse de stabilité de l'écoulement. Le passage à un écoulement pleinement turbulent induit une augmentation très importante du flux de chaleur aérodynamique sur la paroi : il peut atteindre plusieurs dizaines de mégawatts par mètre carré, ce qui n'est pas sans conséquences pour la paroi.

### Simuler l'écoulement couplé à la thermique via la paroi

Ces phénomènes thermiques particulièrement violents dégradent la paroi en la carbonisant et la consomment progressivement par réactions chimiques avec l'air et par sublimation. C'est le phénomène d'ablation. Il provoque une récession de la paroi de l'objet en vol. L'état de surface se modifie (des rugosités apparaissent) et des gaz chauds sont libérés par la paroi. L'écoulement est donc à son tour modifié par le phénomène d'ablation qu'il a généré. Enfin, les flux thermiques provoquent un échauffement de l'objet.

Au final, écoulement aérodynamique, ablation de la paroi et état thermique du corps de rentrée dans l'atmosphère



**Figure 3 : Test d'une éprouvette de corps de rentrée grâce à un moyen expérimental de type « jet de plasma » et simulation de l'expérience.**

sont intimement couplés et il faut résoudre de manière simultanée ces trois phénomènes physiques. Le problème, multidimensionnel, couplé et multiphysique (couvrant plusieurs domaines de la physique) est donc hautement complexe. Les équipes du Centre CEA - Cesta l'ont résolu en s'appuyant sur la simulation, validée par l'expérience. Elles ont développé un code aérothermique, c'est-à-dire résolvant le couplage écoulement aérodynamique – ablation – état thermique. Elles ont traité précisément les modifications de géométrie et de masse dues à l'ablation, et ont mis au point un modèle de turbulence à deux équations intégrant une modélisation fine de la proche paroi. Les résultats des calculs sont validés dans un premier temps par des comparaisons avec des résultats issus d'essais en soufflerie, réalisés à l'ONERA, pour la partie de l'écoulement hors transferts thermiques. Pour reproduire en laboratoire les phénomènes thermiques et d'ablation, des moyens expérimentaux de type jet de plasma sont mis en œuvre sur le site d'ArianeGroup en Gironde. Ils permettent d'appliquer les pressions et les flux de chaleur rencontrés sur les matériaux lors de la phase de rentrée dans l'atmosphère, et de valider la modélisation des effets couplés aérodynamique – ablation – thermique (Figure 3). L'outil de simulation est ensuite éprouvé sur des objets en vraie grandeur testés en vol. En somme, l'association de modèles physico-numériques adaptés et validés par des expériences dédiées permet de prédire avec fiabilité les températures et les contraintes thermiques subies. Il faut maintenant concevoir le corps de rentrée pour qu'il résiste à ces températures extrêmes.

### Résister aux températures extrêmes

Le corps de rentrée doit donc à la fois résister à des températures extrêmes et isoler la charge nucléaire et les équipements de la tête, pour les maintenir à une température relativement faible, compatible avec leur fonctionnement nominal. Aucun matériau structurant n'est capable de supporter seul ces températures. Il faut donc les protéger avec des matériaux spécifiquement conçus à cet usage, qui isolent thermiquement la structure et

la charge utile de deux façons : d'une part, par isolation thermique classique (des matériaux à faible conductivité), d'autre part, par blocage d'une partie des flux thermiques incidents au travers du phénomène d'ablation précédemment décrit.

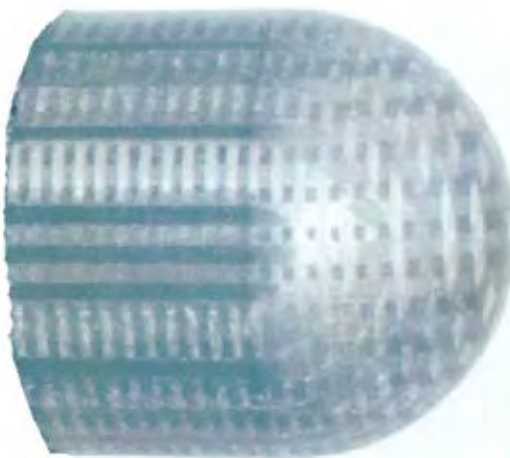


Figure 4 : Éprouvette composite carbone / fibre de carbone.

Concevoir les matériaux dits ablatifs qui assurent cette fonction amène à relever de nombreux défis. Une fonction d'isolation optimale implique généralement le choix de matériaux de résistance mécanique insuffisante. Or ces matériaux doivent aussi posséder une excellente résistance mécanique ! En effet, ils sont soumis, surtout en fin de rentrée atmosphérique, à des flux thermiques intenses, qui engendrent de très forts gradients thermiques entre les parois externes exposées à l'écoulement et les zones internes beaucoup plus froides. Les dilatations différentielles<sup>2</sup> ainsi générées donnent lieu à de fortes contraintes thermiques. Pour résister à la fois aux températures extrêmes, aux contraintes thermiques et aux pressions externes, des matériaux naturellement résistants à des températures de l'ordre de plusieurs milliers de degrés (proche de la température de surface du Soleil !) sont élaborés suivant des architectures spatiales 3D qui leur confèrent une tenue mécanique exceptionnelle même à ces températures.

Les composites matrice carbone/fibre de carbone (Figure 4) comptent parmi les matériaux les plus résistants de cette

famille. Ils sont obtenus en réalisant des préformes tissées en fil de carbone, ensuite densifiées par une matrice de carbone obtenue selon divers procédés (par exemple, une densification par « craquage » sur les fibres de précurseurs liquides ou gazeux).

Par ailleurs, la charge nucléaire et les équipements de la tête doivent rester à une température relativement faible, compatible avec leur fonctionnement nominal. Cela n'est possible qu'avec des isolants thermiques très performants. Mais les matériaux superisolants sont en général mécaniquement très fragiles, et ne sont pas en mesure de supporter les fortes contraintes thermiques subies. Il faut donc améliorer leurs performances mécaniques sans dégrader leurs propriétés thermiques. Une des voies

explorées consiste à les renforcer grâce à un squelette solide. Ce dernier structure mécaniquement le matériau tout en préservant le volume nécessaire pour réduire la propagation de la chaleur grâce à l'introduction d'un autre milieu (gaz, mousse, aérogel). La fabrication de ces matériaux complexes s'appuie sur la simulation et l'impression 3D (voir « Procédés et matériaux : un savoir-faire spécifique »).

Nous avons vu comment le corps de rentrée peut en même temps remplir sa fonction de protection et encaisser les fortes contraintes thermiques inhérentes à cette fonction de protection. Déterminons maintenant comment il peut résister aux contraintes mécaniques liées aux fortes accélérations et aux vibrations.

<sup>1</sup> Ce n'est pas le cas à haute altitude. Le milieu raréfié demande de recourir à un modèle microscopique issu de la théorie cinétique des gaz, dont la résolution numérique représente un vrai challenge de calcul à haute performance. Nous résisterons, par manque de place, à la tentation de parler davantage de ce sujet...

<sup>2</sup> Un exemple familier de l'effet des contraintes thermiques est le verre qui casse quand on le remplit d'un liquide chaud : les dilatations différentielles mettent la paroi externe en traction. Plus quantitativement, la différence de température  $\Delta t$  entre les parois externe et interne du verre génère une contrainte en  $E\alpha\Delta t$ , où  $E$  est le module d'Young, et  $\alpha$  le coefficient de dilatation du matériau constitutif.





### Résister aux contraintes mécaniques

Les niveaux d'accéléérations statiques longitudinales et transverses atteignent parfois une centaine de fois la pesanteur terrestre et provoquent ainsi des contraintes mécaniques élevées. Les simulations permettent de calculer ces contraintes et de s'assurer qu'elles n'endommagent pas le corps de rentrée. Une centrifugeuse permet de tester la résistance des équipements et de la tête à ces niveaux d'accélération. Elle est, par ailleurs, équipée d'un excitateur électrodynamique (un pot vibrant) en bout de bras, ce qui permet de combiner environnements statiques et vibratoires. Les résultats de ces tests permettent de valider les résultats des simulations.

### Vibrer sans casser

Les fluctuations de pression à la paroi, générées par l'écoulement turbulent, induisent des vibrations aléatoires. Il faut estimer l'intensité de ces vibrations pour s'assurer qu'elles n'endommagent pas le corps de rentrée et pour évaluer les niveaux vibratoires des équipements et de la charge dans une large gamme de fréquences (20Hz-20kHz). Le calcul de l'écoulement, validé par des essais en soufflerie, permet de déterminer les fluctuations de pression à la paroi. La réponse vibratoire à ce terme source est ensuite calculée par deux méthodes de simulation complémentaires : modélisation par éléments finis à basse fréquence et estimation statistique de l'énergie vibratoire à haute fréquence. Une expérimentation acoustique au sol, dans la chambre acoustique développée au Centre CEA - Cesta, permet de valider cette chaîne de simulations. Enfin, une chaîne de mesure spécifique enregistre les réponses vibratoires jusqu'à 45 kHz lors d'une expérimentation en vol et les retransmet au sol. Cette combinaison de modélisations, simulations et expérimentations permet de bien estimer le niveau de vibration et de s'assurer qu'il ne risque pas de détériorer le corps de rentrée et les équipements internes. Concevoir une tête résistante aux environnements thermiques et mécaniques extrêmes générés pendant le vol est donc difficile, mais possible, en s'appuyant sur des simulations multiphysique précises validées par des expériences dédiées. Mais nous

n'avons fait qu'une partie du chemin : il faut encore tout mettre en œuvre pour survivre aux agressions potentielles de la défense adverse.

### Survivre aux agressions

Parmi les systèmes déployés par les défenses adverses, un des plus redoutables est l'intercepteur nucléaire ou missile antibalistique (Anti Ballistic Missile ou ABM). L'explosion nucléaire de forte énergie de l'ABM va générer des flux intenses de particules, neutrons et photons de haute énergie. Nous en présenterons d'abord les effets macroscopiques, à savoir mécaniques et thermiques.

### Les effets mécaniques d'un ABM

L'interaction entre le rayonnement X généré par l'ABM et la matière produit un très fort dépôt d'énergie, quasi instantané, dans le corps de rentrée. Les phénomènes physiques induits par ces dépôts peuvent être classés selon leurs temps caractéristiques.

Globalement, un choc est d'abord généré, puis des vibrations, et enfin des contraintes thermomécaniques.

### Le thermochoc

Le dépôt d'énergie, régi par l'interaction des photons X avec la matière, a une durée de quelques dizaines de nanosecondes, mais son intensité est telle que la couche externe est vaporisée, et qu'apparaît un choc de grande intensité<sup>3</sup>, appelé thermochoc car il est produit par un dépôt d'énergie. Lors de sa propagation dans l'épaisseur de la paroi du corps de rentrée, le thermochoc se fait rattraper par le faisceau d'ondes de détente qui le suit : son niveau diminue mais sa durée augmente. À l'issue de cette phase, d'une durée de plusieurs microsecondes, le thermochoc initial s'est transformé en une série d'ondes de contraintes élastiques. Ces ondes de contraintes font des allers et retours dans la paroi du corps de rentrée.

<sup>3</sup> L'intensité d'un choc est caractérisée par le niveau de compression qu'il engendre. Après le passage du choc, la matière se décomprime, produisant des ondes de détente.



### **La phase de réponse vibratoire**

Le dépôt d'énergie dépend de l'angle d'incidence du rayonnement par rapport à la surface irradiée. Les profils de dépôt varient ainsi en fonction du point courant, de même que le niveau de choc et d'impulsion qu'ils induisent. Cette inhomogénéité de chargement donne naissance à des ondes de contrainte qui se propagent tangentiellement. La quantité de mouvement est communiquée à l'ensemble de l'objet et les différents modes de vibration sont excités, ce qui produit la phase de réponse vibratoire, d'une durée de quelques centaines de millisecondes. On retrouve alors des contraintes vibratoires, comme dans la phase de rentrée dans l'atmosphère.

### **La phase de réponse thermomécanique**

À l'issue de la phase de réponse vibratoire, les divers équipements se retrouvent dans un équilibre mécanique alors qu'ils sont encore soumis à des gradients thermiques importants provenant de l'hétérogénéité des dépôts d'énergie.

Le retour à l'équilibre thermique génère de nouvelles contraintes et de nouvelles déformations. C'est la phase de réponse thermomécanique, qui peut durer plusieurs dizaines de secondes.

### **Garantir la tenue aux effets mécaniques d'un ABM**

La simulation expérimentale des effets mécaniques que produiraient sur nos armes des ABM ne peut se faire en vraie grandeur : reproduire en laboratoire de tels niveaux de sollicitation est impossible ! La démonstration de la tenue face à ces menaces repose alors sur la simulation fine de l'enchaînement des phénomènes physiques décrits plus haut, et sur la validation par parties de la chaîne de simulation à l'aide de moyens expérimentaux capables de reproduire tout ou partie de cet enchaînement sur des échantillons ou des maquettes.

Ainsi, la phase de dépôt d'énergie et de thermochoc est validée à l'aide de machines électrotechniques de hautes puissances pulsées.

Ces machines (comme César, représenté sur la figure 4) génèrent un faisceau d'électrons intense qui permet de réaliser des dépôts d'énergie de plusieurs kilojoules par gramme en quelques dizaines de nanosecondes.

La phase de réponse vibratoire est, quant à elle, validée à l'aide de générateurs de pression intense, comme GEPI. La tenue de l'arme face aux effets mécaniques d'un ABM peut donc être démontrée, comme pour la rentrée dans l'atmosphère, à l'aide d'une combinaison judicieuse de simulations et d'expériences. Mais le travail n'est pas terminé pour autant. En effet, les rayonnements des ABM ont aussi des effets potentiellement destructeurs sur l'électronique embarquée dans l'arme nucléaire.

### **Résister aux effets radiatifs d'un ABM**

Les rayonnements corpusculaires (neutrons de fission et de fusion, protons, électrons) et électromagnétiques (photons gamma et X), produits par l'ABM, induisent sur les composants électroniques de multiples effets. Par exemple, les neutrons énergétiques, en entrant en collision avec les atomes des semi-conducteurs constitutifs des circuits électroniques, les éjectent de leurs sites au sein du réseau cristallin.

Les atomes éjectés peuvent à leur tour percuter et déplacer d'autres atomes. Le processus se poursuit en cascades d'irradiation.

Des défauts d'empilement résiduels consécutifs à ces cascades peuvent ainsi apparaître : lacunes, occupations d'un site par deux atomes... On conçoit que ces défauts puissent perturber gravement le fonctionnement des transistors et donc de l'électronique de l'arme ! À ces effets permanents, il faut ajouter des effets transitoires, comme la génération de courants parasites, susceptibles eux aussi de provoquer des dysfonctionnements.

Pour garantir la fiabilité en environnement radiatif, les sous-ensembles électroniques sont caractérisés expérimentalement sur différentes installations qui simulent chacune un terme source radiatif.

La machine Asterix, conçue sur la base d'un générateur de 6 méga-volts reproduit les effets d'un flux de photons sur des composants électroniques.

Pour les futurs systèmes d'armes, une démarche ambitieuse pour garantir les circuits électroniques par la simulation est développée grâce à une chaîne de simulation numérique multiéchelle (voir « *Du microscopique au macroscopique : maîtriser et relier les échelles* »). L'objectif est d'évaluer le comportement sous irradiation des fonctions électroniques. Les défauts produits par les cascades d'irradiation sont ainsi déterminés par des simulations de dynamique moléculaire classique. Quantifier l'effet de ces défauts sur les propriétés du matériau semi-conducteur demande de travailler en dynamique moléculaire quantique.

Grâce à la simulation numérique, la qualification radiative des composants et circuits intégrés se trouvera ainsi moins dépendante des installations expérimentales : à terme, la démonstration de la tenue aux agressions de notre électronique reposera donc sur la simulation, validée par des expériences par parties.



Figure 4 : César (situé sur le Centre CEA - Cesta) est une machine électrotechnique de haute puissance pulsée.





Là aussi, la synergie entre physiciens modélisateurs, numériciens<sup>4</sup> et informaticiens des équipes de la DAM, en interaction avec leurs partenaires universitaires et industriels, est essentielle au succès de la démarche ! Nous allons maintenant dire quelques mots de la filière électronique silicium sur isolant, initiée il y a une quarantaine d'années pour répondre à cette demande de résistance aux environnements radiatifs.

### Le silicium sur isolant

L'électronique classique n'est pas conçue pour résister aux effets des rayons ionisants. Il a donc fallu développer des composants plus résistants. L'idée est d'isoler électriquement les transistors les uns des autres pour les rendre moins sensibles aux courants parasites produits par les rayonnements ionisants.

Pour ce faire, en 1974, le CEA a imaginé une solution reposant sur des composants en silicium déposés sur une couche de matériau isolant. Des études prospectives sont lancées, avec au départ, des résultats décevants.

Mais après une dizaine d'années de développement, la technologie devient crédible, avec le SIMOX, ou silicium sur oxyde obtenu en « bombardant » du silicium massif avec des ions oxygène (*Separation by Implanted OXygen*).

La DAM et la DGA parient alors sur le SIMOX et financent la création d'un atelier de fabrication. C'est à partir de cet atelier qu'est lancée la start-up SOITEC, qui développe les filières SOI (*Silicium On Insulator*), puis FD-SOI (*Fully Depleted SOI*).

Cette dernière technique consiste à superposer, sur le matériau brut en silicium, une couche d'oxyde amorphe de 20-25 nanomètres d'épaisseur, puis une autre couche de silicium de 6 nanomètres d'épaisseur, où sont incrustés les canaux du transistor.

La couche d'oxyde agit comme un isolant et confine les électrons entre la source et le drain : il n'y a plus de courant de fuite.

La filière se révèle de ce fait très performante en termes de consommation d'énergie, un atout décisif pour les ap-

plications mobiles (téléphones portables, montres connectées...), car une faible consommation permet d'augmenter l'autonomie.

Aujourd'hui, SOITEC détient, directement ou par voie de licence, 80 % du marché mondial du FD-SOI et emploie plus de 1500 personnes dans le monde. Trois fondeurs majeurs (STMicroelectronics, Samsung et GlobalFoundries) ont adopté le FD-SOI et proposent des circuits gravés en 28, 22 et bientôt 18 nanomètres, avec le 12 nanomètres en perspective. La multiplication des dispositifs électroniques à basse consommation, par exemple pour l'internet des objets, et plus généralement, la recherche de la performance énergétique, ouvrent de vastes perspectives pour cette filière. La nécessité de résister aux environnements radiatifs a lancé une belle aventure industrielle, dont nous ne voyons probablement que les prémices !

<sup>4</sup> Les numériciens traduisent les équations des modèles physiques sous une forme numérique que les calculateurs peuvent résoudre.



## CONCLUSION

La conjugaison des sollicitations extrêmes de la mission, des agressions de la défense adverse et de la nécessité pour les armes de rester opérationnelles pendant des dizaines d'années, conduit à un cahier des charges à première vue intenable.

Mais le défi a été relevé, en mobilisant des équipes dans une large palette de disciplines : physiciens des écoulements, des matériaux et du rayonnement, mécaniciens du solide et des milieux continus, électroniciens, numériciens, concepteurs et fabricants de matériaux, concepteurs de technologies, expérimentateurs... à la DAM, mais aussi dans les laboratoires et chez les industriels de notre pays.

Assurer la résistance à ces environnements extrêmes nous mène aux frontières de la connaissance, tant les phénomènes à prévoir sont complexes : simulation d'écoulement en zone de transition à la turbulence, couplage de multiples phéno-

mènes physiques, large gamme d'échelles de temps et d'espace. Les méthodes employées pour les résoudre sont donc en constante évolution.

Elles intègrent et intégreront encore davantage dans le futur une forte composante de simulations, pour des prévisions toujours plus fiables dans des domaines inaccessibles à l'expérience, mais ces simulations auront toujours besoin d'expériences pour être validées.

De la nécessité de résister à des environnements radiatifs extrêmes est née une nouvelle filière électronique, avec d'excellentes performances énergétiques.

Déjà présente dans presque tous nos smartphones, elle est appelée à prendre une part importante du marché des applications mobiles et de l'internet des objets. De la contrainte peut parfois naître l'excellence...



A vibrant blue sky filled with numerous white, fluffy clouds of varying sizes and densities. The clouds are scattered across the frame, creating a dynamic and textured background. The lighting is bright, suggesting a clear day.

RENDRE LES OBJETS  
iNViSiBLES





**Les systèmes de défense des pays que la France veut dissuader sont alertés notamment par des radars de veille. Pour tromper ces radars, les têtes nucléaires doivent être furtives, c'est-à-dire indétectables ou, en d'autres termes, « invisibles ». Pour cela, elles doivent absorber les ondes émises par les radars de sorte que leur taille apparente soit de l'ordre du millimètre. Cet artifice s'obtient en jouant sur la forme et sur les matériaux de la tête nucléaire.**

## RENDRE LES OBJETS INVISIBLES

**P**our la crédibilité de la dissuasion, la tête nucléaire doit être capable de pénétrer les défenses adverses, ou, en termes imagés, d'être « invisible ».

Plus précisément, il faut échapper aux moyens de détection, essentiellement les radars. Pour détecter un objet volant, les radars émettent des ondes électromagnétiques et « écoutent » les signaux renvoyés. Il faut donc minimiser autant que possible le signal renvoyé.

Nous présenterons d'abord les ondes électromagnétiques, et les systèmes de détection, composés de radars à diverses fréquences.

Nous montrerons ensuite comment évaluer ce signal : quelle physique et quelles mathématiques permettent de traiter l'interaction d'un objet avec l'onde émise par le radar et comment le minimiser pour se rapprocher de l'idéal d'invisibilité.

### ≡ Les ondes électromagnétiques

Qu'est-ce qu'une onde ?

Il est difficile de donner une réponse à la fois précise et unique à cette question.

En termes intuitifs, on peut dire qu'une onde est la propagation d'un signal, d'une perturbation, dans un certain milieu, à une vitesse identifiable.

Les ondes les plus facilement observables sont les vagues à la surface de l'eau ; ici, c'est une perturbation de la hauteur d'eau qui se propage. La distance entre deux vagues successives est la longueur d'onde, une grandeur fondamentale dans la description des phénomènes ondulatoires. Les ondes sonores, quant à elles, mettent en jeu des variations de la pression et de la densité du milieu ambiant (l'air le plus souvent), ces variations se produisant à des fréquences audibles.

Les ondes acoustiques sont de même nature et englobent à la fois les ondes sonores et celles que l'oreille ne perçoit pas, comme les infrasons. Lorsqu'elles se propagent au sein d'un solide, on parle d'ondes élastiques, dont font partie les ondes sismiques qui se propagent à la surface de la Terre et que détectent les sismographes. Nous retrouverons les infrasons, les ondes sismiques, ainsi que les tsunamis (vagues dévastatrices) dans l'article « À l'écoute du globe ».

Les ondes électromagnétiques, quant à elles, sont des variations de champs électrique et magnétique, qui se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière. La lumière visible, les micro-ondes, les ondes radio, les ondes radar, tous ces phénomènes sont des ondes électromagnétiques.

Les équations qui régissent tous ces phénomènes ont été établies par le physicien écossais James Clerk Maxwell il y a plus d'un siècle, vers 1870.

Les ondes se distinguent par leur fréquence, ou encore leur longueur d'onde (quelques fractions de micromètre pour la lumière visible, quelques centimètres à quelques centaines de mètres pour les ondes radar et radio).

### ≡ Qu'est-ce qu'un radar ?

Le principe de base du radar (pour *radio detection and ranging*) est d'émettre une onde électromagnétique à partir d'une antenne ; cette onde se propage dans l'espace et, quand elle rencontre un obstacle, une partie de l'énergie portée par l'onde est renvoyée dans toutes les directions, dont en particulier celle du radar. On dit que l'onde radar est diffractée. La fraction d'énergie renvoyée vers le radar peut permettre la détection, voire l'identification, de la cible. Il faut donc diminuer autant que possible la quantité d'énergie renvoyée.

Les radars existants émettent, pour la plupart, à des longueurs d'onde variant de quelques centimètres à quelques mètres. Les longueurs d'onde métriques, peu absorbées pendant leur propagation, sont utilisées par les radars très longue portée (plusieurs milliers de kilomètres) de surveillance du territoire. Elles exigent des antennes de grandes dimensions, des alimentations puissantes (plusieurs mégawatts), et sont donc réservées à de grandes installations. Les radars dédiés à la défense d'un objectif travaillent à des longueurs d'onde décimétriques.





Quant aux radars de guidage des missiles sol air, ils utilisent des longueurs d'onde centimétriques (à titre d'illustration, les radars de contrôle de vitesse sur les routes émettent à des longueurs d'ondes entre 1 et 3 centimètres).

Les systèmes de défense reposent sur un ensemble de radars. Il faut donc échapper à la détection dans une très large gamme de longueurs d'onde, ce qui est un problème difficile, car la physique de l'interaction d'une onde avec un objet, désignée par le terme générique de diffraction, dépend de manière cruciale du rapport entre longueur d'onde et taille de l'objet. La résolution de notre problème d'invisibilité commence par la compréhension des phénomènes de diffraction.

## La diffraction : de la physique aux mathématiques

Plongeons un objet, par exemple métallique, donc très conducteur, dans le champ établi (on parlera de champ incident) d'une onde électromagnétique. L'intuition suggère (fort justement) que le champ électrique tangent à l'objet va mettre en mouvement les électrons proches de la surface de l'objet, donc produire un courant, qui va à son tour rayonner un champ électromagnétique. Il reste à quantifier cette intuition en la transformant en un problème soluble mathématiquement. Supposons pour simplifier un conducteur parfait. À la surface de l'objet, le champ électrique tangent doit être nul (sinon, le courant serait infini), mais ce n'est pas possible s'il n'existe que le champ incident. Il va donc apparaître un champ complémentaire, appelé champ diffracté, qui compense le champ incident à la surface de l'objet. La condition de nullité du champ électrique tangent à la surface de l'objet porte sur le champ total. La condition, dite condition aux limites, sur le champ diffracté, est donc qu'il soit l'opposé du champ incident.

Du point de vue du mathématicien (appliqué), le problème de la diffraction consiste à résoudre les équations de

Maxwell, dont les inconnues sont les champs électromagnétiques diffractés en chaque point de l'espace extérieur à l'objet. Il s'agit d'équations aux dérivées partielles (EDP). Les équations aux dérivées partielles, et en particulier la résolution de ces équations dans un domaine sur la frontière duquel sont imposées des conditions aux limites, sont une branche importante des mathématiques.

Une fois les équations et leurs conditions aux limites établies, l'une des premières tâches du mathématicien consiste à formuler le problème en termes rigoureux et à démontrer que les équations ont une solution, et que, si c'est le cas, la solution est unique (autrement, cela signifierait que le problème est mal posé, que la modélisation est incomplète). On montre dans le cas de notre problème de diffraction qu'il faut ajouter une condition, dite de rayonnement, expliquant le comportement du champ à très grande distance de l'objet, ou encore comment l'amplitude de l'onde doit décroître au fur et à mesure qu'elle s'éloigne, pour obtenir l'unicité.

Cette condition peut être considérée comme une condition aux limites à l'infini : le problème est en effet posé dans l'espace extérieur à l'objet.

Il s'agit ensuite de proposer des méthodes efficaces pour résoudre, avec une précision suffisante, le problème posé. La résolution dite analytique, où l'on obtient un résultat exact et général, exprimé par une formule compacte, est généralement impossible, sauf si l'objet est de forme simple. Même dans ce cas, la solution du problème demande un travail conséquent, qui a mobilisé des scientifiques de l'envergure de Rayleigh, si l'objet est un cylindre, ou de Sommerfeld, qui résolut le problème de la diffraction par un demi-plan.

La liste des problèmes exactement solubles s'agrandit, d'ailleurs avec des contributions de chercheurs de la DAM, mais il faut se contenter pour tout objet ne figurant pas dans cette liste d'une approximation numérique. Nous présenterons plus loin quelques méthodes de résolution.

## Concevoir un objet furtif

Du point de vue du concepteur d'objets furtifs, la quantité d'intérêt est le champ diffracté  $E_d$  à très grande distance. La grandeur naturelle pour quantifier son intensité est la *surface équivalent radar*, ou SER. Cette quantité, homogène à une surface, comme son nom l'indique, est proportionnelle au rapport de l'énergie diffractée, celle qui retourne au radar, et de l'énergie incidente.

Cette surface n'a pas de lien direct avec celle de l'objet. À titre de curiosité mathématique, la SER d'une sphère parfaitement conductrice de rayon  $R$  vaut  $\pi R^2$ , soit exactement sa surface projetée.

Bien que le problème de diffraction soit formulé de manière unique, le phénomène physique observé dépend de manière cruciale du rapport de la longueur d'onde à la taille de l'objet.

Si ce rapport est grand, l'effet essentiel est la polarisation globale de l'objet, qui répond essentiellement comme un dipôle, dans le champ électrique de l'onde incidente. Si, au contraire, il est petit, on peut utiliser des méthodes fondées sur des rayons. La plus simple de ces méthodes, l'optique géométrique, nous est familière. Elle n'est précise que pour des longueurs d'onde très petites devant la taille de l'objet. Par exemple, il est licite de traiter l'interaction de la lumière visible, mélange de longueurs d'onde d'une fraction de microns, avec un instrument d'optique de taille centimétrique (rapport de  $10^{-4}$ ). Pour traiter de l'interaction des ondes radar, même centimétriques, avec des objets métalliques, présentant en plus bien souvent des détails fins, il faut compléter les lois de l'optique géométrique. Ce travail a été réalisé à partir des années 1960.

Il a donné naissance aux théories de la diffraction. La plus connue est la théorie géométrique de la diffraction (TGD) initiée par J. B. Keller, qui ajoute aux rayons usuels de l'optique géométrique des rayons diffractés (attention, pas dans le même sens que plus haut) par les singularités de l'objet (arêtes vives, disconti-



**Figure 1 : Avion furtif de combat F-117A Nighthawk de l'US Air Force volant au-dessus du Nevada en 2002.**

nuités de la courbure, pointes coniques, etc.), ainsi que des rayons rampants à la surface de cet objet. La TGD fournit une évaluation du champ diffracté sous forme de contributions de ces différents rayons. Les rayons réfléchis suivent les lois de Descartes, intuitivement familières à tous ceux (qu'ils se dénoncent) qui ont joué dans leur enfance à faire réfléchir la lumière du soleil sur un petit miroir.

Un rayon qui se diffracte sur une arête émet un cône de rayons, appelé cône de Keller, dont l'axe est la tangente à l'arête. Les contributions les plus fortes sont celles dues aux rayons réfléchis, puis, par importances décroissantes, aux rayons diffractés par des arêtes vives, par des pointes de cône, par les discontinuités faibles (de rayon de courbure par exemple) et par les rayons rampants. Cette interprétation physique du champ diffracté est un guide précieux, comme nous allons le voir, pour concevoir des objets à faible SER.

### **Diminuer la « surface de diffraction » du missile**

Plusieurs méthodes sont possibles, qui peuvent être combinées, pour atteindre un résultat optimal. Nous en présentons quelques-unes.

Un des objets furtifs les plus connus est le F117 (Figure 1). La SER de cet avion doit être minimale dans un secteur particulier, le secteur avant (l'avion qui attaque est principalement vu de face par le radar).

La forme retenue est presque entièrement composée de facettes planes, toutes convenablement orientées pour ne pas réfléchir l'énergie dans cette direction. Les arêtes sont également orientées pour ne pas diffracter en secteur avant.

Une autre possibilité, utilisée pour certains drones furtifs, est d'exclure autant que possible les arêtes afin de supprimer les diffractions associées.

L'objet est alors constitué, à l'opposé du F 117, de formes lisses. Il faut également éviter les points dits spéculaires, c'est-à-dire les rayons réfléchis revenant vers le radar. Leur contribution à la SER est en effet le produit des rayons de courbure  $R_1$  et  $R_2$  de la surface en ces points.

Le bombardier B2 (Figure 2) combine les deux méthodes et est en plus recouvert d'un matériau dont les caractéristiques restent secrètes.

Il est aussi possible de jouer sur les conditions aux limites. La diffraction par un objet conducteur est générée par une condition aux limites imposant la nullité du champ électrique tangent, autrement dit un rapport, appelé impédance et noté  $Z$ , entre l'amplitude du champ électrique sur celle du champ magnétique égal à 0. Or, ce rapport est fixé pour une onde plane se propageant dans le vide. Il est noté  $Z_0$  et appelé impédance du vide.

Une idée simple est d'imposer une condition aux limites d'impédance  $E=Zn \wedge H$  à la surface de l'objet, en choisissant  $Z=Z_0$ . Le respect de cette condition permet au moins qu'une onde plane arrivant en incidence normale sur l'objet ait un coefficient de réflexion, égal à  $Z - Z_0 / Z + Z_0$ , nul. Une telle condition peut être imposée, au moins approximativement, par un revêtement approprié. Nous présenterons dans la section suivante des matériaux utilisables pour s'approcher d'une telle condition.

Enfin, des solutions dites actives, où on cherche à émettre un signal opposé au signal diffracté sont possibles, mais demande une connaissance très précise du champ diffracté et du contre champ émis pour qu'ils se compensent efficacement.



**Figure 2 : Bombardier B-2 Spirit de l'US Air Force volant au-dessus de l'océan Pacifique en mai 2006.**





## Les matériaux qui rendent furtif...

Dans le cadre de la recherche de la performance des matériaux de furtivité pour un large spectre de fréquences et une faible masse, les avancées techniques les plus marquantes ont été celles liées aux composites à base de métaux ferromagnétiques et leur modélisation. On citera notamment les composites à base de couches minces ferromagnétiques, mais aussi ceux à base de fils ferromagnétiques ou plus récemment de pétales ferromagnétiques.

Tous ces composites innovants permettent de mettre en œuvre des technologies différentes (PVD et technologies roll-to-roll pour les couches minces, technologies textiles pour les fils, projection pour les pétales) avec des performances, des mises en œuvre et des coûts différents. Pour chaque type de composite, le fonctionnement magnétique est spécifique et a été décrit dans des modèles associés.

Les équipes de la DAM, en collaboration avec Dassault Aviation et le LPS (CNRS Orsay), ont démontré qu'il existe des bornes théoriques sur le spectre d'absorption magnétique d'un matériau, qui sont liées à son magnétisme réel ( $M_s$  = aimantation à saturation). Les performances obtenues par les absorbants magnétiques de la DAM sur un large spectre de fréquences sont assez proches de l'optimum théorique.

## Calculer le champ diffracté

Pour garantir la performance de furtivité de la tête, il faut calculer avec précision le champ diffracté, c'est-à-dire résoudre le problème aux limites évoqué plus haut pour les équations de Maxwell. L'une des solutions possibles consiste à transformer l'équation aux dérivées partielles d'origine en une équation intégrale (équation où les fonctions inconnues apparaissent dans des intégrales). L'avantage de cette formulation est double : d'une part, elle satisfait automatiquement la condition de rayonnement et, d'autre

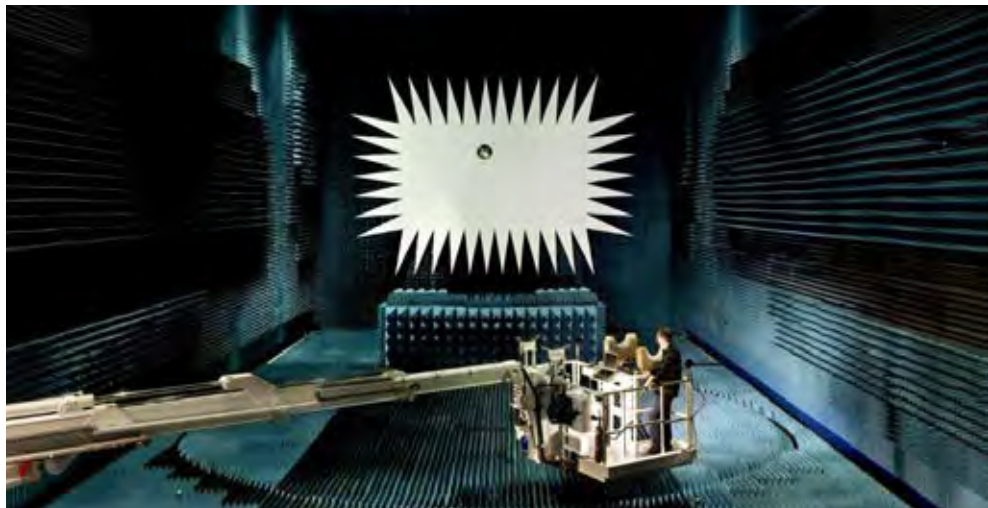
part, le problème est ramené d'un volume (celui de l'espace extérieur à l'objet) à une surface (celle de l'objet). Les méthodes de résolution par équations intégrales ont considérablement progressé depuis les années 1980, grâce à un effort soutenu de la communauté académique et industrielle sur le sujet.

Très récemment, des techniques dites de compression multiniveau ont permis de franchir une nouvelle étape dans les possibilités de cette méthode.

Pour simplifier, nous sommes passés de la possibilité de traiter un nombre de degrés de liberté maximum d'une dizaine de milliers au début des années 1980 à un milliard aujourd'hui. Nous pouvons donc traiter 100 000 fois plus de degrés de liberté.

avec l'INRIA Bordeaux Sud-Ouest, sont fortement impliquées dans ces avancées.

Les équations intégrales ne permettent de traiter que des matériaux homogènes. Pour des matériaux présentant des variations continues de propriétés diélectriques ou magnétiques, il faut revenir à une méthode plus classique, consistant à découper le matériau en petits volumes. La condition de rayonnement peut être formulée en utilisant une équation intégrale de surface, ou bien une condition aux limites absorbantes. Enfin, les méthodes dites asymptotiques haute fréquence dérivées de la TGD gardent un intérêt, grâce à leur faible coût, indépendant de la fréquence, pour la compréhension qu'elles permettent des phénomènes de diffraction.



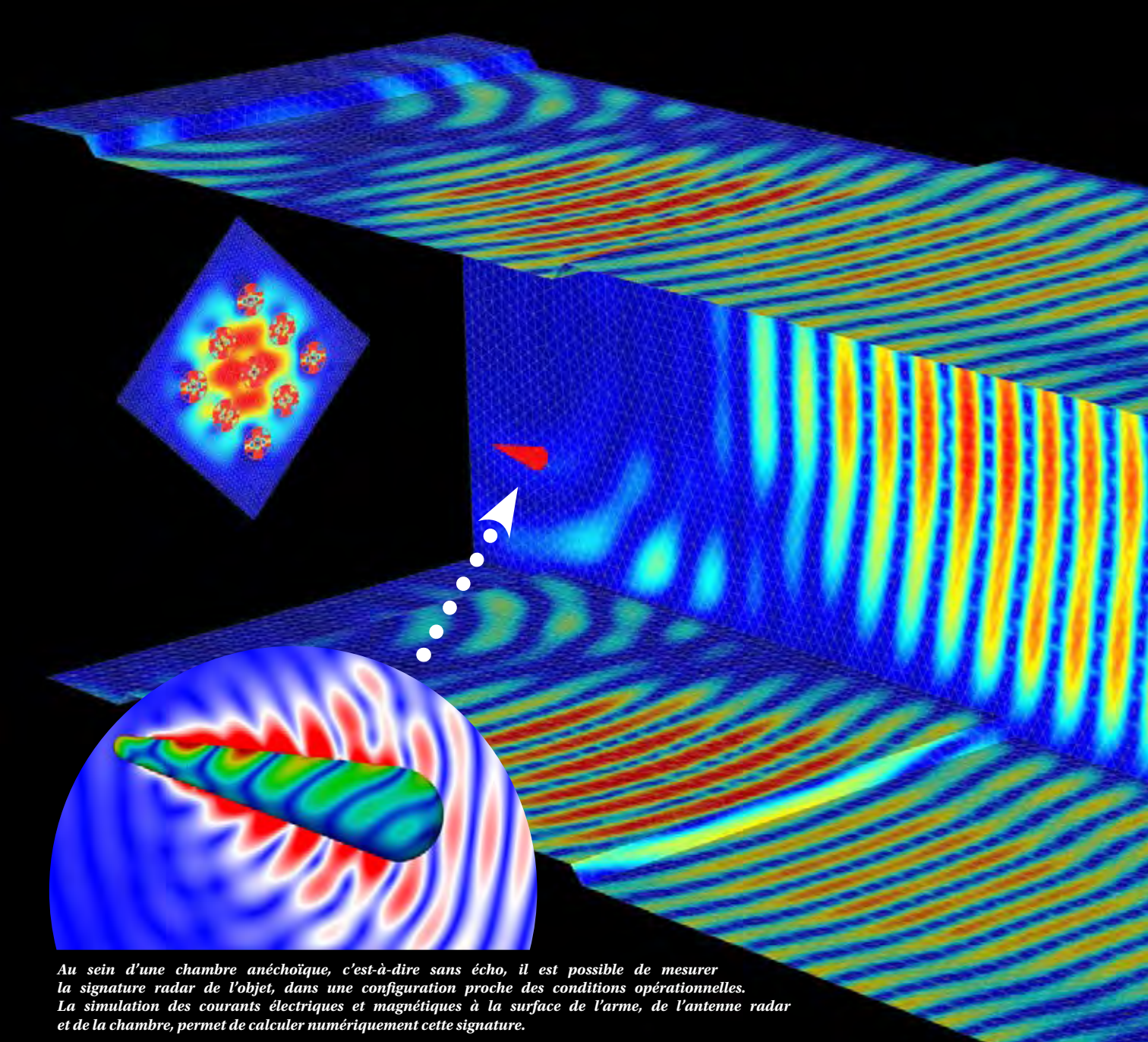
« Chambre anéchoïque », c'est-à-dire sourde aux échos, permettant de mesurer la signature radar d'une tête nucléaire, dans une configuration proche des conditions opérationnelles (Centre CEA - Cesta).

C'est une performance remarquable car la méthode génère des matrices pleines, et le temps de calcul, sans effort particulier sur la méthode, serait proportionnel au cube de ce nombre. Autrement dit, nous aurions multiplié le temps calcul par quelque  $10^{15}$ . Elle n'a été possible que par des progrès conjoints des méthodes mathématiques, des schémas numériques, des techniques de programmation, et bien sûr des ordinateurs, avec une mention spéciale pour les processeurs graphiques, dont la puissance de calcul phénoménale (7,5 Teraflops crête en double précision pour les derniers modèles...) a pu être efficacement exploitée. Les équipes de la DAM (sur le Centre CEA - Cesta, près de Bordeaux), en collaboration

Pour toutes ces raisons, et parce qu'elles deviennent plus précises lorsque la fréquence augmente, elles sont complémentaires des méthodes numériques, dont le coût s'accroît rapidement avec l'élévation des dites fréquences. Les équipes de la DAM ont contribué à les adapter à des objets à faible SER revêtus de matériaux [1], étendant ainsi la palette d'outils de calcul du champ diffracté vers les très hautes fréquences.

### Référence :

[1] « Interactions électromagnétiques » Chocs n°44, décembre 2013.



*Au sein d'une chambre anéchoïque, c'est-à-dire sans écho, il est possible de mesurer la signature radar de l'objet, dans une configuration proche des conditions opérationnelles. La simulation des courants électriques et magnétiques à la surface de l'arme, de l'antenne radar et de la chambre, permet de calculer numériquement cette signature.*



## CONCLUSION

La quête de l'invisibilité radar est un travail multidisciplinaire qui implique des physiciens spécialistes des problèmes de diffraction, des physiciens des matériaux, des mathématiciens appliqués et des informaticiens. Peut-être plus encore que dans d'autres domaines, l'accroissement de performance des ordinateurs a été essentiel pour évaluer les solutions proposées. Mais l'objet le mieux conçu n'est rien sans les ingénieurs capables de le fabriquer. C'est une tâche ardue : les matériaux composites à base de métaux ferromagnétiques sont délicats à mettre en œuvre, et, à ce niveau d'exigences, le moindre défaut de fabrication peut générer un champ diffracté plus fort que celui de l'objet sans défaut et mettre ainsi à bas tout

l'effort de conception. Nous nous garderons aussi d'oublier les concepteurs et réalisateurs de mesures, elles aussi particulièrement délicates, vu les très faibles niveaux des signaux recherchés : ils ont permis de valider tout ce travail de conception et de fabrication. Enfin, en dépit des bons résultats obtenus, il reste encore des concepts à explorer, qui permettront sans doute de se rapprocher du Graal de l'invisibilité parfaite. Comme toujours dans l'éternel combat du glaive et du bouclier, un progrès des performances de discrétion incite la menace à s'adapter. Des techniques nouvelles en matière de télédétection voient le jour et la quête d'invisibilité nécessite de les prendre en compte. Tous ces développements constituent autant de défis scientifiques et technologiques que les équipes de la DAM, en coopération avec les laboratoires de recherche, devront relever dans les prochaines décennies.



À L'ÉCOUTE  
DU GLOBE



***La DAM a développé depuis sa création une expertise dans la détection et la localisation d'explosions nucléaires. Ces compétences, internationalement reconnues, ont donné à la France un rôle actif dans le déploiement du Système de Surveillance International par les pays signataires du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires. Cette expertise a aussi permis la mise en place du Centre d'alerte aux tsunamis pour l'Atlantique Nord-Est et la Méditerranée occidentale, que la DAM opère pour aider les pouvoirs publics, en France et dans les pays concernés, à évacuer à temps les populations en cas d'arrivée d'un tsunami.***

## À L'ÉCOUTE DU GLOBE

**D**epuis les origines, une des missions de la DAM, pour le compte des plus hautes Autorités de l'État, est la détection et la localisation, avec une fiabilité élevée, d'explosions nucléaires, aériennes, souterraines, ou sous-marines.

Ces explosions génèrent des signaux, mais, à grande distance, leur intensité est faible, et ils sont, comme on le verra, noyés dans un bruit ambiant produit par les phénomènes naturels et les activités humaines.

Pour remplir cette mission, la DAM<sup>1</sup> a très tôt développé une expertise scientifique et technique dans des domaines variés, allant de la conception et la réalisation des moyens de détection adaptés à l'interprétation détaillée des signaux enregistrés.

Ainsi, en 1955, un microbarographe, appareil mesurant d'infimes variations de la pression atmosphérique, permit de détecter depuis Paris un essai émanant de Bikini<sup>2</sup>. Dès lors, la voie était ouverte du côté français pour déployer des moyens perfectionnés de détection des expérimentations nucléaires autour du globe ; il revint tout naturellement à la DAM de s'en charger.

Le Traité d'Interdiction Complète des Essais (TICE), ouvert à la signature en 1996 et ratifié par 182 pays aujourd'hui,

a changé drastiquement le contexte de la surveillance des essais nucléaires. Il n'existe plus de zone préférentielle de surveillance, mais un espace global, qui inclut les continents, les océans et l'atmosphère. Il a fallu mettre en place un Système de Surveillance International (SSI), en regroupant les compétences et les moyens des pays signataires.

Grâce à son expertise internationale-ment reconnue, la France a été un interlocuteur essentiel des discussions préalables à la signature du traité, et un partenaire actif de la construction et de l'exploitation du SSI, qui comprend les stations d'observation françaises et s'appuie sur le savoir-faire et les compétences de la DAM.

Cette expertise a aussi été mise au service du public pour prévoir l'arrivée des tsunamis sur les côtes et se protéger de leurs effets dévastateurs.

Mais comment détecter, localiser et évaluer l'énergie dégagée par des explosions lointaines ?

Essentiellement comme nous le faisons naturellement pour percevoir les sons et les images qui nous entourent : à partir des ondes qu'elles émettent.

Voyons quelles sont ces ondes et comment les discerner de celles issues d'autres sources, humaines ou naturelles.

### **/// Tour d'horizon des ondes sonores qui parcourent le globe**

Le globe terrestre est constamment parcouru par des ondes acoustiques, d'origine et de nature variées, qui parcourent l'intérieur et la surface du globe terrestre, ainsi que son atmosphère.

Les premières, dites élastiques, se propagent dans les milieux solides, comme les continents, ou plus simplement le sol ; les plus connues sont les ondes sismiques.

Les deuxièmes, hydro-acoustiques, se propagent dans l'océan et les dernières sont les infrasons dans l'atmosphère.

### **Les ondes dans le sol**

Pour comprendre la physique des ondes, concentrons-nous sur celles que la majorité d'entre nous connaissent : les ondes acoustiques qui constituent notamment le son audible (ainsi que les infrasons). Ces ondes se propagent dans les gaz, par exemple l'air, et les liquides, comme l'eau, et engendrent des variations de pression et des déplacements dans le sens de propagation de l'onde.

<sup>1</sup> Avec l'appui de Yves Rocard, professeur de physique à l'ENS-Ulm, membre du Comité de l'énergie atomique

<sup>2</sup> Cf. Yves Rocard : « Mémoires sans concessions », éd. Grasset, 1988, p.180.





Même dans un solide, ces ondes existent ! On parle alors d'ondes élastiques. On peut s'en convaincre en touchant une cloche ou en frappant un verre avec un couteau : on ressent des vibrations. Mais comme, par définition, un solide peut résister au cisaillement, la situation est plus complexe que dans un gaz ou un liquide.

Car outre les ondes de pression (P), qui se déplacent dans le sens de propagation de l'onde, il existe dans les solides des ondes de cisaillement (S), qui se propagent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Chaque type d'onde a sa propre vitesse. Celle-ci dépend de la densité et de la compressibilité du milieu.

Néanmoins dans l'ensemble, ces ondes sont rapides : par exemple, dans la croûte terrestre, la célérité de propagation est d'environ 6 à 8 km/s pour les ondes P et de 3 à 4 km/s pour les ondes S.

Le signal de toute onde, qu'elle soit sonore ou électromagnétique (voir « *Rendre les objets invisibles* »), décroît avec la distance. Le déplacement produit par les ondes P et S dites de volume, qui se propagent à l'intérieur du globe, diminue ainsi par « effet géométrique de dilution », comme l'inverse de la distance.

La situation est un peu plus favorable pour les ondes dites de surface. Ces dernières sont confinées près de la croûte terrestre (car leur déplacement décroît exponentiellement quand on s'enfonce dans le sol). Leur dilution géométrique est seulement proportionnelle à la racine carrée de la distance. Mais, pour tous les types d'ondes, il faut ajouter les effets de dissipation, qui atténuent le signal émis de façon exponentielle, surtout à haute fréquence. Donc l'onde est d'autant plus difficile à détecter qu'on est loin de sa source.

Quelles sont les sources des ondes élastiques dans le sol du globe ? Toute explosion souterraine en produit. Les activités humaines, notamment les tirs dans les mines et les carrières, engendrent des signaux comparables à

ceux d'une explosion nucléaire. S'ajoutent à ceux-ci les signaux naturels, produits principalement par les séismes. Le lecteur intéressé pourra trouver dans [1] une information à la fois précise et accessible sur les séismes, dont nous nous limiterons ici au rappel des éléments essentiels.

Les séismes naissent aux points de fragilité de la croûte terrestre, autrement dit sur les failles, la plus célèbre étant la faille de San Andreas, en Californie.

Les déplacements continus des plaques déforment les roches, qui, comme un ressort que l'on comprime, accumulent des tensions et de l'énergie élastique tant que la faille résiste et reste bloquée. Mais lorsque la tension maximale est atteinte, la faille glisse – en somme, le ressort se détend –, libérant tout ou partie de l'énergie accumulée, notamment sous forme d'ondes élastiques.

Ces dernières se propagent alors à l'intérieur et à la surface du globe, s'ajoutant ainsi aux ondes d'origine humaine. Ce bain d'ondes sismiques est permanent, mais d'intensité variable : il se renforce considérablement après des séismes importants, à cause des répliques qui leur sont associées.

Les énergies libérées peuvent atteindre tout le globe et dépasser largement celles produites par une explosion nucléaire. On voit poindre une difficulté : comment distinguer la signature d'une explosion nucléaire dans un bain de signaux qui lui ressemblent et peuvent être plus intenses, soit parce qu'ils sont plus proches, soit parce qu'ils émettent plus d'énergie ?

Il faut arriver à détecter le signal faible et rare d'une éventuelle explosion, noyé dans le bruit de fond, qui correspond à tout ce qui se superpose au signal et gêne sa détection.

Pour y parvenir avec la haute fiabilité requise, il est nécessaire non seulement de bien prédire les ondes engendrées par les explosions – le signal mais aussi de développer une expertise solide sur les ondes sismiques – le bruit. C'est ce que nous faisons à la DAM.

## Les ondes dans l'océan : le monde du non-silence

Des ondes se propagent aussi dans les océans, un monde qui n'est pas aussi silencieux qu'il en a l'air... Ces ondes proviennent soit de sources sous-marines, d'explosions ou de séismes, soit de sources terrestres, les ondes élastiques que nous venons de présenter. En effet, ces dernières, lorsqu'elles arrivent à l'interface d'un solide et d'un liquide, comme le fond de l'océan, produisent des ondes sonores de volume dans l'océan. À ces sources d'ondes s'ajoutent les cris des grands animaux marins, notamment des baleines, le bruit des hélices de bateaux, celui des vagues...

L'océan est hétérogène : la vitesse du son y varie avec la profondeur, ce qui provoque des effets de guidage (un peu comme un rayon lumineux piégé dans une fibre optique). Une onde guidée décroît moins rapidement qu'une onde ordinaire (intuitivement, le guidage empêche ou limite la dilution géométrique de l'onde). Avec ces effets de guidage et la très faible atténuation du milieu marin, les ondes se propagent à grande distance en s'atténuant moins que dans le sol. Ainsi, un signal produit dans l'eau peut être détecté même à grande distance : on a pu détecter l'explosion de grenades sous-marines (quelques kilogrammes d'explosif) ayant eu lieu au large du Japon à plus de 3 000 kilomètres de là [1].

À ces ondes de volume s'ajoutent celles de surface, parfois appelées ondes d'eau. Les plus fréquentes : les vagues, sommairement caractérisées par leur longueur d'onde de l'ordre du décamètre (la distance de crête à crête). Comme pour les ondes de surface près de la croûte terrestre, le déplacement que la vague produit sous elle-même décroît exponentiellement, sur une distance de l'ordre de sa longueur d'onde. Donc, en haute mer, il est insensible sur le fond. En revanche, les tsunamis, des vagues de très grandes longueurs d'onde (plusieurs dizaines de kilomètres) engendrées par des séismes sous-marins, déplacent, même en grande profondeur, l'eau sur toute sa hauteur jusqu'au fond marin.



## **Infrasons : propagation dans l'atmosphère**

Si le son audible est rapidement atténué, il n'en est pas de même des ondes acoustiques de basses fréquences (en dessous de 20 Hertz), nommées infrasons. Elles se propagent donc à grande distance. De plus, l'atmosphère est hétérogène, ce qui provoque, comme pour l'océan, des effets de guidage. Mais l'atmosphère n'est pas un milieu constant : températures, densités, vitesses des vents, qui influent sur le déplacement des ondes, sont très variables. D'où une propagation dépendante du temps. Enfin, il est difficile de bien connaître les températures et les vitesses des vents, en particulier en altitude. En conséquence, la détection des ondes dans l'atmosphère revêt un aspect statistique.

Les sources d'infrasons, humaines ou naturelles, sont multiples : explosions volontaires (dont la plus puissante est probablement Misty Picture [2], dédiée à l'étude des infrasons et qui a mobilisé 4 700 tonnes d'explosifs) ou accidentelles, comme celle de l'usine AZF, éruptions volcaniques, éclairs d'orage – pour n'en citer que quelques-unes.

En outre, l'atmosphère est couplée au sol et aux océans : en particulier, les infrasons produits par la houle sont présents sur tout le globe terrestre. Réciproquement, les ondes terrestres et océaniques engendrent aussi des infrasons. Cela illustre, une fois de plus, que nous devons traiter un problème global pour détecter, localiser et identifier des explosions nucléaires.

## **/// Détection, /// localisation, /// identification**

Le Système de surveillance international (SSI) s'appuie, pour assurer un niveau de fiabilité maximal, sur un système à trois composantes complémentaires : la surveillance sismologique, dédiée aux ondes du sol, la composante hydroacoustique, qui scrute les océans, et enfin la détection des infrasons.

### **Surveillance sismologique**

La surveillance sismologique repose sur des capteurs, appelés sismomètres,

(Figure 1) sensibles aux mouvements du sol dans trois directions perpendiculaires, le plus souvent verticale, d'est en ouest, et du nord au sud. La plupart des sismomètres sont mécaniques : dans le principe, ce sont des systèmes masse-ressort.

Le mouvement de la masse est enregistré sur un sismogramme. Les performances de l'appareil (ainsi que son prix...) dépendent de sa capacité à enregistrer des déplacements de basse fréquence, produits notamment par les grands séismes, qui engendrent des oscillations globales de la Terre.

Une détection n'est possible que si le déplacement que l'on cherche à enregistrer est dans la gamme de sensibilité de l'appareil : compte-tenu de la décroissance des ondes avec la distance, une station d'enregistrement trop lointaine ne détectera pas l'événement. D'où la nécessité d'un réseau de stations suffisamment dense : leur multiplication à la surface du globe est donc un atout décisif.

Mais encore faut-il exploiter efficacement les quantités considérables de données produites...

Les experts chargés d'analyser les données sismiques utilisent des outils de détection automatiques, déjà intégrés dans des systèmes d'alerte rapide.

L'amélioration des performances de ces outils, portée par les progrès des méthodes d'apprentissage statistique, est un domaine de recherche très actif.

La localisation d'un événement utilise essentiellement les temps d'arrivée de son signal enregistrés aux diverses stations. La position de l'épicentre sismique est déterminée par minimisation de l'écart (quadratique moyen) entre les temps d'arrivée observés et calculés.

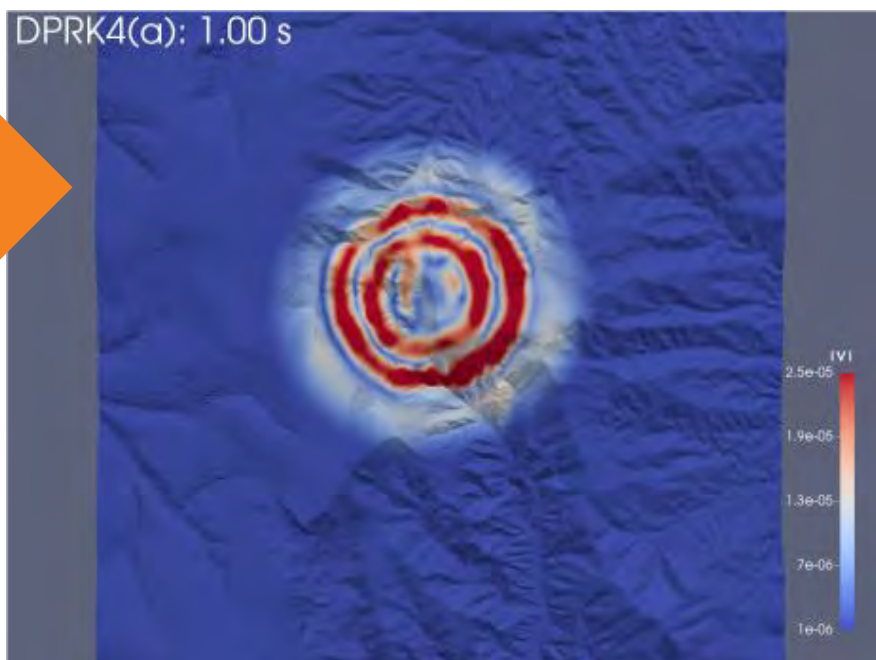
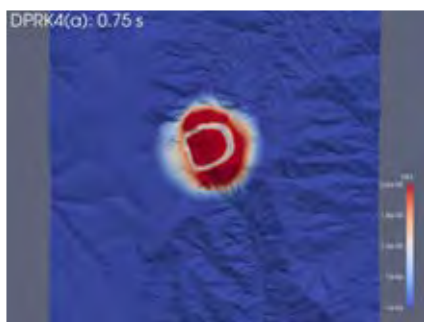
En d'autres termes, il faut que trois stations au moins enregistrent l'événement pour le localiser par triangulation. Le calage précis des horloges des stations et la bonne connaissance des vitesses de propagation des milieux traversés sont essentiels pour une localisation fiable.

Quant à l'identification de l'événement, elle repose sur la forme du signal recueilli. Le contenu de ce dernier dépend en effet de la nature de l'événement – une explosion produit principalement des ondes P, un séisme, des ondes P et S – et des propriétés des milieux traversés.



*Figure 1 : Sismomètre « ZM500 », conçu à la DAM, qui équipe les sites de surveillance sismique du CEA en France.*





Pour identifier et caractériser précisément la source explosive produisant un signal sismique, il faut être capable de simuler avec précision toutes les étapes qui engendrent ce signal. Détaillons un peu la physique de ces différentes étapes.

L'explosion produit dans son voisinage immédiat des effets mécaniques : les sols se déforment et se fracturent, une cavité se forme, comme on peut le voir sur la figure 2.

À distance suffisante de l'explosion, les déformations, de plus faible amplitude, deviennent élastiques. Ces dernières engendrent les ondes qui vont se propager, sur des milliers de kilomètres, à l'intérieur et à la surface du globe. On retrouve un nouvel exemple de problème multiphysique et multiéchelle !

La DAM, en collaboration avec l'École Centrale et l'Institut de Physique du Globe, a lancé l'ambitieux programme FRESQUE pour simuler avec une grande précision toutes les phases du phénomène et leur couplage.

Par exemple, la phase de fracturation utilise une méthode d'éléments discrets spécifiques, et la phase de propagation associe une description détaillée des milieux traversés et des méthodes numériques précises<sup>3</sup>.

Il va sans dire que ces simulations hautement « parallélisables » bénéficient pleinement (voir « *Comprendre et prévoir par la simulation* ») des puissants moyens de calcul du centre DAM Île-de-France, et tireront le meilleur parti des futures machines de classe exaflopique.

Dans ce domaine aussi, les perspectives en simulation sont extraordinaires !

Pour identifier et caractériser précisément une source explosive, on utilise aussi les signaux collectés dans le passé : un séisme ou une explosion produit à un endroit donné engendre un signal de forme relativement constante.

L'analyse de corrélation des signaux en cours aux signaux passés va aider à les identifier.

L'augmentation du volume de données recueillies est mise à profit pour automatiser l'identification avec des méthodes d'apprentissage statistique.

Ces dernières, complémentaires des méthodes traditionnelles, montent en puissance grâce à l'avènement des techniques d'apprentissage profond appuyées sur la puissance de traitement des ordinateurs.

Ainsi, on détermine avec une bonne précision la nature (explosion ou séisme) de l'événement, et son intensité : l'énergie dégagée par l'explosion ou la magnitude du séisme.

On peut même être encore plus précis, et calculer le moment sismique (défini comme le produit  $\mu DS$  de la rigidité  $\mu$  au cisaillement du milieu par la surface glissante  $S$  de la faille et son déplacement  $D$ ). Il caractérise l'énergie dissipée par le séisme.

Pour fixer les idées, le moment sismique d'un séisme de magnitude 4 est de l'ordre de la kilotonne (soit l'énergie dégagée par l'explosion de mille tonnes d'explosif de type TNT).

Une autre manière plus récente et originale, de détecter un séisme [1] est de scruter les réactions du public.

Une augmentation des SMS et des échanges téléphoniques au voisinage de l'épicentre, une hausse du trafic sur le site web du Centre sismique euro-méditerranéen (le CSEM, un des tout premiers centres d'information sismologique au monde), signifient que des témoins recherchent des informations. Le nombre de tweets contenant le mot séisme et de lançements de l'application smartphone LastQuake, développée par le CSEM, sont aussi de bons indicateurs.

<sup>3</sup> Pour les aficionados, une méthode d'éléments spectraux.

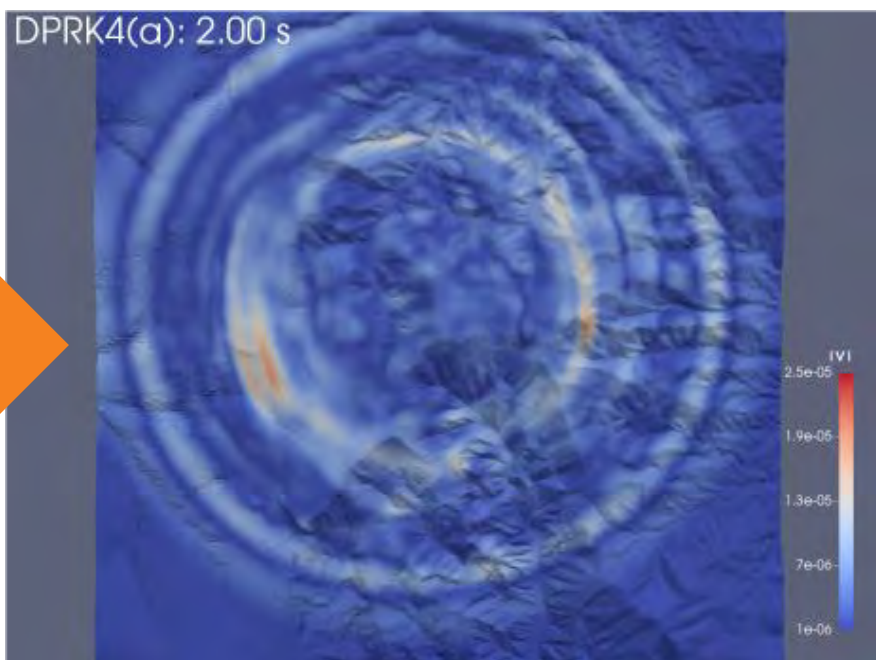


Figure 2 : Déformation des sols et génération d'ondes suite à une explosion souterraine.

Plus généralement, l'apparition de sismomètres relativement bon marché, utilisant des MEMS (microsystèmes électromécaniques), laisse penser qu'une communauté de sismologues amateurs émergera dans quelques années, comme il existe depuis longtemps une communauté d'astronomes, de météorologues ou de botanistes amateurs. Leur contribution sera un apport bienvenu, complémentaire de nos capacités de surveillance des séismes, même si la précision des sismomètres grand public laisse à désirer.

Nous assistons aux débuts de la sismologie citoyenne !

### Surveillance hydroacoustique

Pour la détection des ondes dans l'eau, un réseau de stations hydroacoustiques a été installé. Certaines d'entre elles sont sous-marines. Leurs capteurs sont des hydrophones. Ces stations sont très performantes, mais coûteuses à installer et à maintenir en état.

En effet, elles fonctionnent dans des environnements pour le moins inhospitaliers : corrosion par l'eau de mer,

fortes pressions, températures proches de zéro ! Heureusement, la faible atténuation des ondes dans l'eau permet de surveiller l'ensemble des océans avec un petit nombre de stations.

D'autres stations, établies sur des îles ou le long du littoral, exploitent la conversion des ondes hydroacoustiques en ondes sismiques, appelées ondes T, lorsqu'elles rencontrent la côte. Ces ondes T sont parfois, pour certains séismes qui ont lieu en Algérie par exemple, le signal de plus forte énergie enregistré dans les stations du littoral du sud de la France.

Quant à la détection des infrasons, peu atténués, elle peut se faire à grande distance : un réseau de surveillance des infrasons est donc un complément utile des réseaux de surveillance sismique et hydroacoustique. Les capteurs de ces stations de surveillance sont des microbarographes, sensibles aux moindres variations de pression. Et une station n'utilise pas un seul, mais une batterie de capteurs : ainsi, elle est capable de détecter d'où vient le signal (sa direction).

En revanche, la conception et l'exploitation efficace des stations infrasons supposent une expertise multidisciplinaire. En effet, l'atmosphère étant un milieu variable et imparfaitement connu, statisticiens et physiciens doivent s'associer pour tirer le meilleur parti des mesures.

Il faut aussi d'importantes compétences en traitement du signal (le bruit du vent perturbe les mesures), et, bien sûr, en conception et réalisation d'instruments : la sensibilité extrême demandée aux microbarographes est un véritable défi ! Évidemment, le panel de disciplines scientifiques et techniques nécessaires à la conception et à la mise en place du SSI est encore plus vaste [3,4,5].

À l'énumération précédente, il faut pour le moins ajouter la sismologie, la simulation des phénomènes ondulatoires dans des milieux complexes, le calcul haute performance, et le traitement de données massives, qui ouvre de nouvelles perspectives, en particulier l'automatisation de la détection grâce aux réseaux de neurones profonds.

Trouver et former des experts qui maîtrisent l'ensemble de ces disciplines est un défi qu'il faudra relever dans les années à venir pour tirer le meilleur parti des avancées scientifiques et technologiques.

Gageons que l'intérêt de travailler au confluent de tous ces domaines passionnants suscitera des vocations !

La DAM se devait de valoriser ses compétences au profit du public. Elle l'a fait en mettant en place, dès les années 1960, le CPPT, le Centre polynésien de prévention des tsunamis<sup>4</sup>, puis en 2012, le CENALT, centre national d'alerte aux tsunamis.

Suite au tsunami catastrophique de 2004 dans l'océan indien, l'UNESCO a été mandatée pour construire des systèmes d'alerte aux tsunamis.

<sup>4</sup> Créé en 1965, ce centre assure, en partenariat avec son homologue américain installé à Hawaï, la surveillance pour l'ensemble de l'océan Pacifique.





C'est dans ce cadre que la France s'est engagée à développer un centre national d'alerte aux tsunamis, pour l'Atlantique Nord-Est et la Méditerranée, avec une vocation internationale pour la Méditerranée occidentale.

La DAM, forte de son savoir-faire, a été choisie pour mettre en place et opérer le CENALT.

Rappelons-le : les tsunamis sont des vagues de très grandes longueurs d'onde (plusieurs dizaines de kilomètres), produites par des séismes sous-marins.

En effet, le séisme ébranle la colonne d'eau située au-dessus de lui, et le mouvement engendré se propage ensuite à travers l'océan. La longueur d'onde d'un tsunami est toujours grande devant la profondeur  $h$  de l'océan, si bien que le carré de sa vitesse de propagation vaut  $g \cdot h$ , où  $g$  est l'accélération de la pesanteur. Ainsi, pour une profondeur de 4 000 mètres, la vitesse d'un tsunami est de 200 mètres par seconde.

Ce qui lui permet de traverser en à peu près une heure la Méditerranée, par exemple en cas de séisme au large des côtes algériennes. La vitesse des tsunamis est bien inférieure à celle des ondes sismiques, ce qui laisse un délai court mais non nul pour déclencher l'alerte.

Pour évaluer le risque en continu, le CENALT reçoit, 24 heures sur 24 et 365 jours par an, en temps réel, les données des stations sismiques.

Dès qu'un séisme potentiellement « tsunamigène » est identifié, les temps de trajet de la première vague sont calculés automatiquement, à partir de la position de l'épicentre du séisme et de la profondeur des mers traversées (la bathymétrie).

Les heures d'arrivée du tsunami aux points de prévision définis par les pays riverains sont calculées à partir des temps de trajet et transmises aux autorités via des messages d'alerte.

Simultanément, les paramètres de la source sismique, c'est-à-dire son amplitude, le sens du déplacement, ainsi que la longueur de la faille glissante, sont « injectés » automatiquement dans le code de simulation numérique en temps réel, nommé Calypso.

Ce dernier calcule alors l'amplitude du tsunami au large. Dans un proche avenir, grâce à des modèles détaillés qui utilisent une description haute résolution des littoraux, il sera possible de déterminer précisément la hauteur des vagues sur les côtes, et d'affiner ainsi le niveau d'alerte.

D'ailleurs, grâce à une connaissance précise de la bathymétrie locale, cette fonctionnalité existe déjà pour l'alerte tsunami en Polynésie.

Elle a été récemment validée par comparaison des résultats de calcul aux mesures de marégraphes enregistrées lors du séisme (de magnitude 9) de 2011 au large des côtes du Japon.

### Références :

- [1] R. Bossu, J. Guilbert, B. Feignier, Où sera le prochain séisme ?, EDP Sciences, 2016.
- [2] A. Le Pichon, E. Blanc et A. Hauchecorne, Infrasound monitoring for atmospheric studies, Springer, 2010.
- [3] DAM, CEA, Aléas en géosciences, Revue Chocs, n°45, juin 2014.
- [4] DAM, CEA, À l'écoute du globe, Revue Chocs, 2018.
- [5] Y. Cansi et J. Guilbert, De la surveillance des traités à l'alerte aux séismes et aux tsunamis, Clefs CEA, n°63, 2016.



## CONCLUSION

La surveillance des essais nucléaires dans le cadre du TICE est opérationnelle, 24 heures sur 24, 365 jours par an, et s'améliore encore. Le problème est complexe, certes, mais l'ensemble des acteurs, de toutes disciplines, et la continuité des efforts ont permis de concevoir et de réaliser un système de détection fiable. Les réseaux d'alerte tsunami, d'abord en Polynésie, puis en Méditerranée et en Atlantique Nord-Est, sont de beaux exemples des retombées de ces compétences pour la société civile.

Les moyens de calcul toujours plus performants permettront encore d'améliorer nos capacités de détection, de caractérisation et de prévision, tant pour les séismes que pour les tsunamis.

Et les méthodes de traitements des données massives et d'intelligence artificielle ouvriront de nouvelles perspectives : détection instantanée, aide à l'analyse des signaux. Le métier de sismologue, à la croisée de tous ces savoirs, va devenir encore plus passionnant !



The background is a dark orange-brown color, densely populated with small, semi-transparent numbers (0-9) scattered across the frame. Overlaid on this are numerous thin, flowing lines in shades of yellow and orange, which appear to be data paths or connections, creating a sense of movement and complexity. The overall aesthetic is that of a digital or scientific visualization.

# À LA RECHERCHE DES ULTRA-TRACES



***Dans la lutte contre la prolifération des armes nucléaires, la DAM intervient comme expert auprès de l'État pour la vérification du respect des traités. Pour remplir cette mission, elle a développé les compétences et les moyens pour être capable de détecter, à partir de prélèvements dans une installation, la présence de traces infimes qui seraient la signature d'activités nucléaires à destination militaire.***

## À LA RECHERCHE DES ULTRA-TRACES

**E**n plus de sa mission de conception et de réalisation des armes nucléaires, la DAM apporte un soutien technique à l'État sur certaines problématiques de sécurité nationale. Elle est notamment impliquée dans la lutte contre la prolifération des armes nucléaires.

À ce titre, elle intervient comme expert dans la vérification du respect des traités. Il s'agit plus particulièrement de s'assurer de l'absence, ou de détecter la présence, d'activités nucléaires clandestines. Mais ces activités sont par nature dissimulées avec le plus grand soin. Il faut donc les identifier à partir des traces infimes qu'elles peuvent laisser : en somme, il s'agit de « rechercher leurs ultra-traces ».

Nous verrons d'abord comment il est possible, à partir d'échantillons prélevés dans une installation, de détecter la présence de matière nucléaire, même en quantité infime (il s'agit de mesurer l'isotopie de l'infinitésimal). Puis nous verrons que des analyses très fines permettent même de déterminer les traitements subis par cette matière et ses origines, c'est-à-dire de reconstituer son histoire et de remonter ainsi à d'éventuelles activités non déclarées. En complément de la détection de matière nucléaire, il est aussi très utile, pour mieux cerner une activité clandestine, de détecter et de caractériser certaines substances non nucléaires, mais qui jouent un rôle dans les armes nucléaires, comme les explosifs.

### **Mesurer l'isotopie de l'infinitésimal**

#### **Détecter la matière nucléaire dans quelques grains de poussière**

Les experts de la police scientifique sont aujourd'hui largement médiatisés grâce à de nombreuses séries télévisées. D'autres experts ont un rôle plus discret, mais néanmoins essentiel : ils détectent les tentatives de prolifération nucléaire, en soutien aux instances internationales, en particulier l'Agence internationale à l'énergie atomique (AIEA).

Ces spécialistes ne recherchent pas des empreintes digitales ou des fragments d'ADN ! Ils traquent des quantités infinitésimales de matière nucléaire (uranium et plutonium) cachée dans des prélèvements que les inspecteurs de l'AIEA ont effectués dans les installations nucléaires des pays signataires du Traité de non-prolifération (TNP).

En effet, à l'instar de toutes les activités industrielles, les opérations physiques ou chimiques pratiquées sur les matériaux nucléaires émettent, malgré toutes les précautions mises en œuvre dans l'industrie nucléaire pour confiner la matière, un petit nombre de particules de matière nucléaire. Ces particules de dimensions nanométriques ( $10^{-9}$  mètre) à micrométriques ( $10^{-6}$  mètre) sont bien trop petites pour être visibles, mais elles se répandent dans l'installation, se mélangent à d'autres particules d'origines diverses (organiques, minérales...) et, *in*

*fine*, se déposent sur des surfaces. Le chiffon à la main – un morceau de tissu, appelé « frottis » – les inspecteurs frottent les surfaces et prélèvent cette poussière impalpable. Ils espèrent ainsi prélever, sur les frottis, quelques nanoparticules ou microparticules provenant des matériaux nucléaires – déclarés ou non-déclarés – présents dans l'installation. Seuls quelques laboratoires hautement spécialisés sont accrédités par l'AIEA pour mener à bien les analyses nécessaires pour faire parler ces frottis. Le centre DAM Île-de-France, à Bruyères-le-Châtel dans l'Essonne, en fait partie depuis 2001.

Une fois les prélèvements reçus au laboratoire, un long et patient travail d'expertise débute. Différentes méthodes sont mises en œuvre ; certaines nécessitent la réalisation de purifications chimiques complexes pour extraire sélectivement l'uranium et le plutonium des prélèvements ; d'autres consistent, parmi les innombrables particules environnementales présentes dans le frottis, à identifier et extraire celles qui sont constituées de matière nucléaire (voir l'encadré *Les analyses particulières, un incroyable défi*).

*In fine*, toutes les analyses s'achèvent par des mesures de compositions isotopiques<sup>1</sup> de l'uranium et du plutonium, informations qui permettent d'identifier sans ambiguïté l'usage de la matière – civil ou militaire – et, plus généralement, de confirmer ou d'infirmer les déclarations des exploitants des installations





inspectées. Ces mesures sont réalisées à l'aide des techniques de spectrométrie de masse<sup>2</sup> les plus performantes disponibles actuellement.

Ces instruments, d'autant plus complexes et volumineux que les masses à caractériser sont ténues, permettent de détecter quelques dizaines d'attogrammes ( $10^{-18}$  gramme) de plutonium.

Un attogramme est un milliardième de milliardième de gramme, mais, pour se représenter ce qu'est un attogramme par rapport à un gramme, on peut également comparer un mètre à la distance parcourue par la lumière pendant 100 ans, ou un micron cube à un mètre cube !

Bien évidemment, pour mesurer des quantités aussi faibles, il faut faire preuve d'une rigueur inversement proportionnelle aux masses à détecter !

Cela implique de travailler dans des environnements d'une très grande propreté, comme des salles blanches, et de prendre d'innombrables précautions pour éviter les contaminations par l'atmosphère, les réactifs et le matériel.

Ces techniques d'analyse sophistiquées sont bien sûr aussi mises à profit dans le cadre des programmes de surveillance de l'environnement des sites de la DAM.

Elles nous permettent de vérifier et de garantir que les activités menées dans ces installations ne produisent aucune contamination en radionucléide (isotope radioactif d'un élément) susceptible de porter atteinte aux populations et à l'environnement.

<sup>1</sup> On trouvera dans la figure 5 une définition précise de l'isotope. L'uranium, élément comportant 92 protons, a par exemple plusieurs isotopes (voir « Comprendre la structure du noyau et ses interactions pour en extraire l'énergie ») qui diffèrent par leur nombre de neutrons, dont le 235 fissile.

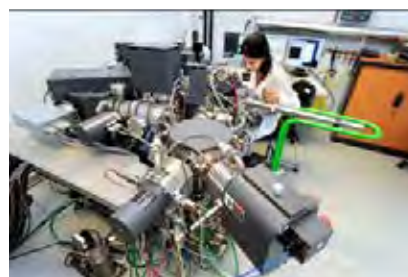
<sup>2</sup> Le spectromètre de masse permet de séparer les constituants d'un échantillon, en fonction de leur rapport masse sur charge, par exemple en les déviant à l'aide d'un champ magnétique. L'encadré Les analyses particulières, un incroyable défi présente un spectromètre de haute sensibilité utilisé à la DAM.

## Les analyses particulières, un incroyable défi !

Identifier, isoler et analyser individuellement quelques microparticules d'uranium parmi les milliards de poussières diverses également présentes dans le frottis (le prélèvement sur site) revient à trouver un grain de sable noir dans un mètre cube de sable blanc ! Pourtant, ces analyses sont aujourd'hui la méthode la plus performante pour vérifier la conformité de certaines opérations industrielles particulièrement sensibles vis-à-vis de la prolifération nucléaire, comme l'enrichissement isotopique de l'uranium. Bien évidemment, tous ces traitements se déroulent dans des environnements ultrapropres à l'intérieur desquels l'air est filtré et déposé.



Traitement des échantillons en salle propre classe 100.



Spectromètre de masse à ions secondaires, capable de détecter quelques attogrammes de matière nucléaire.

## Reconstituer l'histoire de la matière nucléaire

Les analyses isotopiques de traces de matières nucléaires sont fondamentales, mais il faut aller encore plus loin pour faire face aux nouveaux défis de la prolifération nucléaire. Les experts en « analyse de l'infiniment petit » du CEA/DAM développent ainsi de nouvelles méthodologies et instrumentations pour caractériser toujours plus finement les particules de matière nucléaire. En couplant des techniques de spectrométrie Raman avec des microscopes optique ou électronique, ils déterminent très précisément la structure moléculaire et cristalline des composés uranifères constitutifs des particules microscopiques recueillies. Ils sont ainsi à même, comme nous allons le voir, de déterminer l'origine géographique et les procédés industriels appliqués aux matériaux nucléaires détectés, d'identifier et même de dater une activité d'enrichissement !

Pour être utilisable dans une arme ou un réacteur nucléaire, l'uranium doit être enrichi.

Or, la plupart des techniques d'enrichissement reposent sur l'hexafluorure d'uranium, qui a la propriété avantageuse d'être gazeux à température raisonnable. La présence dans l'installation inspectée de composés fluorés de l'uranium, associée à la détection d'une composition isotopique non naturelle, est donc la signature incontestable d'une opération d'enrichissement.

Par ailleurs, la recherche d'impuretés – le plus souvent à l'état de traces – dans les microparticules apporte également son lot d'informations. Ainsi, la mesure des teneurs relatives en éléments de la famille des lanthanides<sup>3</sup> constitue un très bon indicateur du type de gisement minier d'un composé uranifère. Il est ainsi possible de remonter à l'origine des matériaux. Mais les lanthanides ne sont pas, loin s'en faut, les seuls éléments qui nous intéressent. D'autres impuretés élémentaires sont révélatrices d'un procédé industriel donné, au travers de la mise en évidence d'un réactif spécifique.

<sup>3</sup> Les lanthanides, appelés communément « terres rares », occupent une ligne spécifique du tableau périodique des éléments, et sont présents dans les gisements uranifères.



D'autres trahissent une utilisation particulière, civile ou militaire, grâce à la détection d'un élément d'alliage associé au matériau nucléaire.

Il est aussi fort utile de « dater » la matière nucléaire, c'est-à-dire de déterminer quand elle a été purifiée chimiquement lors de son utilisation industrielle. Cela est théoriquement possible via la détection de certains radionucléides descendant de l'uranium et du plutonium. En effet, la purification de la matière nucléaire remet les compteurs à zéro, en éliminant tous les descendants radioactifs. Le comptage des descendants, formés depuis la purification, permet donc de dater la matière nucléaire. Mais c'est une véritable gageure ! En effet, ces descendants radioactifs sont présents en proportions infimes dans des échantillons eux-mêmes infinitésimaux ! D'une part, leur recherche requiert des traitements radiochimiques particulièrement délicats : il faut extraire la totalité des radionucléides du peu de matière disponible, tout en évitant la moindre contamination. D'autre part, seuls des instruments de mesure – des spectromètres de masse – d'une extrême sensibilité sont capables de les détecter.

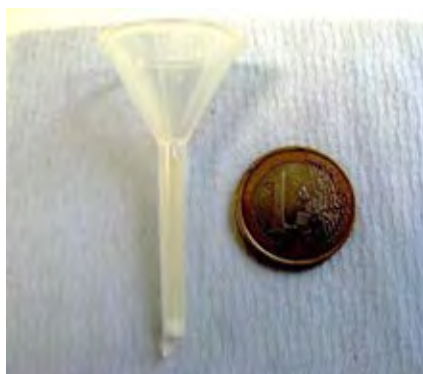
### Analyser l'infiniment petit

La sensibilité des méthodes d'analyse est remarquable, mais il faut aller encore plus loin pour accéder aux informations contenues dans des particules encore plus petites, dont les dimensions ne dépassent pas quelques dizaines de nanomètres. Ce sont en effet de loin les plus nombreuses à être émises par les activités nucléaires industrielles. De plus, les exploitants (et plus encore s'ils ont quelque chose à cacher...) mettent tous les moyens en œuvre pour confiner encore davantage la matière nucléaire, ce qui réduit ainsi le nombre et la taille des particules disponibles pour l'analyse. Les nombres d'atomes à détecter diminuant, les petites contaminations par l'atmosphère, les matériels utilisés et l'environnement de travail qui surviennent pendant les préparations des échantillons, en dépit des précautions

drastiques déjà prises, peuvent devenir significatives et engendrer des fausses détections ou des biais sur les résultats. Face à ce nouveau défi, les experts n'ont d'autre choix que d'abaisser encore les limites de détection de leurs méthodes en améliorant les protocoles de traitement des échantillons ou les instrumentations d'analyse. Deux voies ont ainsi été choisies.

La première (Figure 1) consiste à élaborer des méthodes de « microchimie » qui nécessitent de très faibles quantités de réactifs chimiques (colonnes de résine chromatographique, acides, oxydants et réducteurs...) afin de réduire au maximum les risques de contaminations des échantillons. En diminuant considérablement les volumes de produits chimiques utilisés et d'effluents générés, ces développements s'inscrivent également dans une démarche citoyenne de réduction de l'impact sur l'environnement.

La deuxième voie explorée (Figure 2) consiste à développer des méthodes d'analyse directes, afin de réduire au maximum le nombre et la durée des étapes de préparation des échantillons. C'est le cas par exemple du couplage d'un dispositif d'ablation laser avec un spectromètre de masse à source plasma (ou ICPMS) : les fragments nanométriques arrachés par les tirs laser à la surface de l'échantillon sont entraînés par un flux gazeux à l'intérieur de l'ICPMS.



**Figure 1 : Microcolonne de chromatographie ionique utilisée pour extraire l'uranium de micro-échantillons environnementaux. Le volume de résine utilisé est de l'ordre de 100 µl.**

Le rapport signal sur bruit particulièrement élevé qui résulte de cette mesure très brève – à peine quelques secondes – permet d'envisager de franchir, à terme, le cap de l'attogramme. La nouvelle frontière sera ainsi le zeptogramme ( $10^{-21}$  gramme) et nous ne serons alors plus très loin de mesurer l'atome !

Détecter des quantités infinitésimales de matière nucléaire est fondamental, mais identifier d'autres substances, non-nucléaires, en particulier certaines molécules, apporte aussi, comme nous allons le voir, une information essentielle, complémentaire de la précédente.

### Identifier une molécule : de la mesure de sa masse exacte à l'isotopie de ses atomes

L'explosion chimique est la première étape du fonctionnement d'une arme nucléaire. À ce titre, les explosifs font partie des substances non-nucléaires présentant un fort intérêt en termes de détection et d'identification. La capacité de caractériser de manière globale, à l'échelle moléculaire, la formule chimique d'explosifs à partir d'échantillons présents à l'état de traces, notamment sur les frottis, est fondamentale pour nos applications de non-prolifération nucléaire.



**Figure 2 : Dispositif d'ablation laser (au premier plan) associé à un spectromètre de masse à source plasma (à l'arrière-plan) en salle propre ISO 7.**





Comme pour la matière nucléaire, l'outil essentiel de mesure est le spectromètre de masse, qui permet de séparer les molécules en fonction de leur rapport masse sur charge.

Nous avons vu plus haut que les spectromètres de masse dévient les molécules à l'aide de champs : ces molécules doivent être porteuses de charges électriques pour être sensibles à ces champs. Il faut donc au préalable les ioniser, sans bien sûr les altérer, à l'aide d'une source d'ionisation adaptée.

Depuis quelques années, le couplage de sources d'ionisation à pression atmosphérique avec des spectromètres de masse haute résolution a ouvert de nouvelles voies dans le domaine de l'expertise chimique, comme illustré dans l'encadré ci-contre.

Le couplage de ces sources d'ionisation avec la spectrométrie de masse haute résolution, par exemple la cellule Orbitrap, permet de mesurer la masse exacte des ions formés suite à l'ionisation des molécules, et ainsi d'identifier ces dernières, par la détermination précise de leur formule brute, puis de leur formule développée<sup>4</sup>.

Le potentiel applicatif considérable des spectromètres de masse haute résolution, capables d'analyser des mélanges complexes sans séparation préalable, a stimulé le développement de méthodes d'ionisation moléculaire à pression atmosphérique, simples d'utilisation, polyvalentes, rapides, permettant l'analyse directe de matrices de plus en plus complexes. Les sources d'ionisation de type « analyse directe en temps réel » (désorption par électronebulisation, (DESI) Desorption Electrospray Ionisation) font partie de ces nouvelles sources innovantes fonctionnant à pression atmosphérique.

Elles permettent l'analyse d'explosifs, mais aussi de substances diverses déposées ou prélevées sur des substrats solides.

<sup>4</sup> La formule brute donne la composition chimique d'une molécule ; la formule développée précise l'arrangement des constituants au sein de la molécule.

La polyvalence de ces nouvelles instrumentations justifie leur emploi de plus en plus fréquent dans des domaines divers tels que l'industrie pharmaceutique (médicaments, drogues...), le biomédical (métabolome<sup>5</sup>, tissus biologiques...), la sécurité et les expertises légales (agents chimiques, explosifs...), comme illustré sur la figure 3.

### Mesurer les rapports isotopiques des atomes pour identifier l'origine d'une molécule

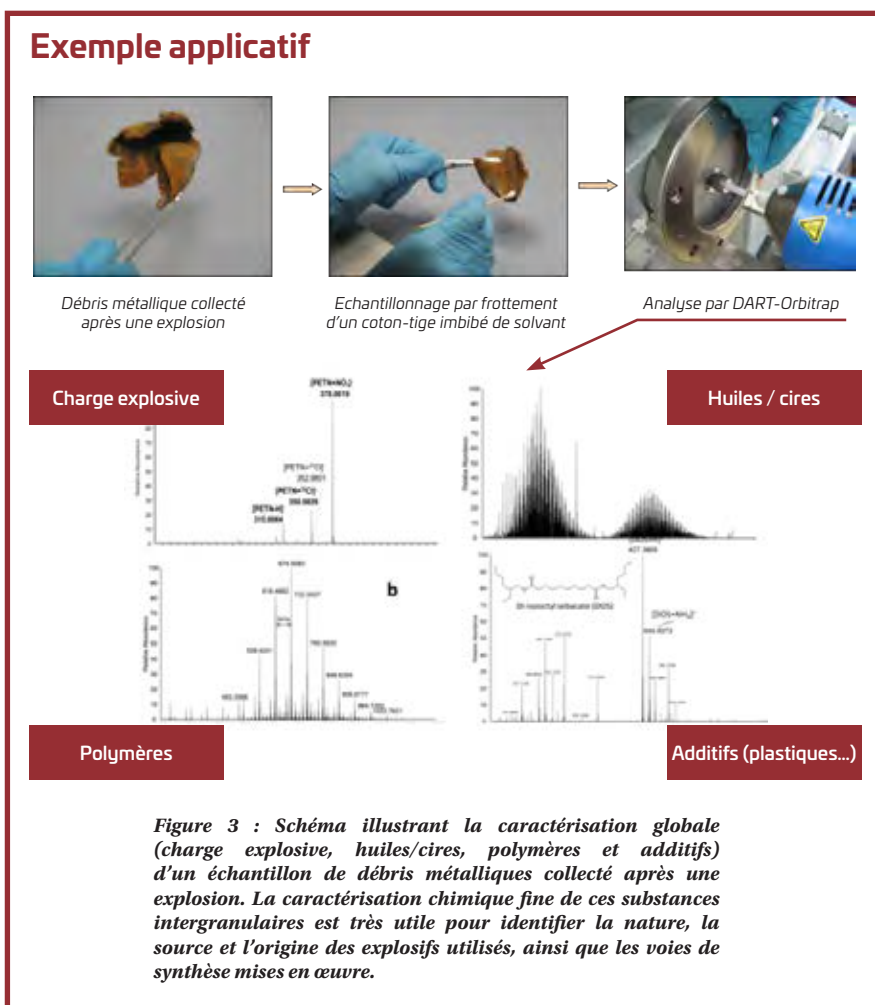
Comme indiqué précédemment, les techniques analytiques modernes permettent de mettre en évidence, de collecter, d'observer et d'analyser une grande variété de traces physiques ou chimiques en relation avec une activité criminelle.

Mais il est souvent difficile de faire le lien entre des composés chimiques récupérés sur un site d'intérêt et une source potentielle.

Ces composés ont en effet des propriétés physiques et chimiques rigoureusement identiques, indépendantes de leur provenance.

La spectrométrie de masse de rapports isotopiques (Figure 4) permet d'obtenir des caractéristiques individuelles intrinsèques qui peuvent, associées aux caractéristiques extrinsèques, accroître la sélectivité dans le processus de comparaison.

<sup>5</sup> Le métabolome est l'ensemble des petites molécules retrouvées dans un tissu biologique.



En effet, l'abondance relative de certains isotopes stables constitutifs de la matière (Figure 5) est une source d'information considérable et se comporte comme une mémoire des origines (du

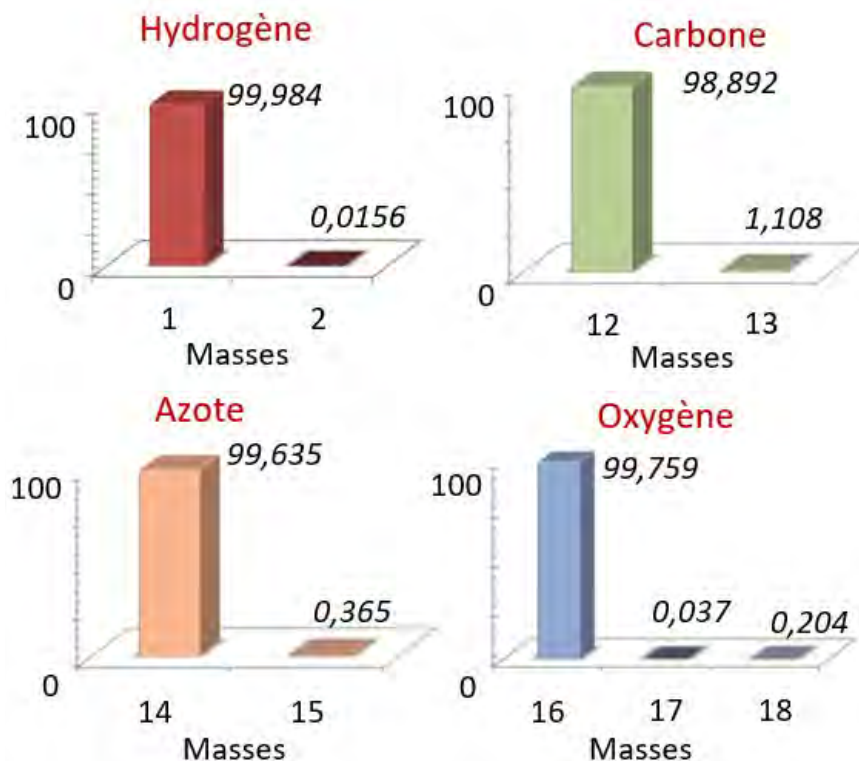
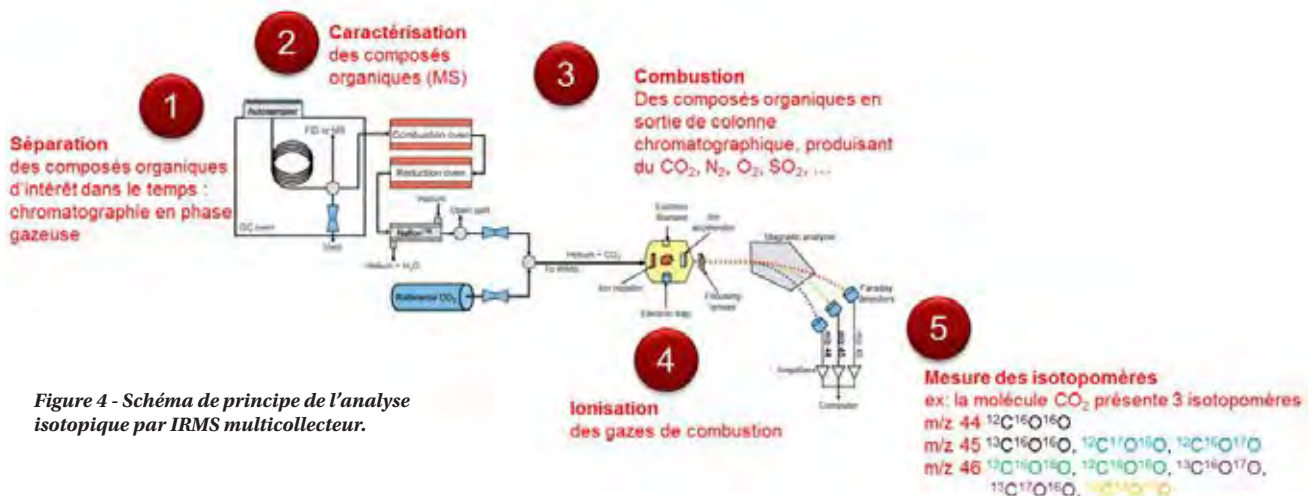
type de synthèse par exemple) et de la transformation de la matière.

En effet, la variation d'abondance des isotopes naturels d'une molécule est

étroitement liée aux précurseurs utilisés lors de sa synthèse.

Ainsi, ces variations d'abondances isotopiques sont utilisées afin de déterminer l'origine d'un explosif.

## Au-delà de la molécule... mesurer les rapports isotopiques de ses atomes



Le terme isotope est dérivé des mots grecs iso et topos qui signifient « même place » dans la classification périodique des éléments chimiques.

Ainsi, les isotopes sont des atomes dont les noyaux contiennent le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons.

Les isotopes sont désignés par un nombre en exposant qui représente le nombre de nucléons (neutrons plus protons).

Ce nombre est placé en haut à gauche du symbole chimique de l'élément, par exemple  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$  pour les trois isotopes du carbone.

Figure 5 - Abondance relative des principaux isotopes stables utilisés en sciences forensiques.





## Vers une identification moléculaire absolue...

**Instrumentation** : Un des outils d'expertise les plus performants pour la détection et l'identification d'explosifs est la spectrométrie de masse de haute résolution (HRMS). L'expertise repose sur la mesure de la masse exacte de ces molécules afin d'en déduire la formule brute.

**Echantillon**  
(débris, tissus...)

**Ionisation**  
Formation d'ions

**Analyse et détection**  
Séparation des ions en fonction de leur rapport  $m/z$  (\*)

**Spectre**  
Intensité des ions =  $f(m/z)$



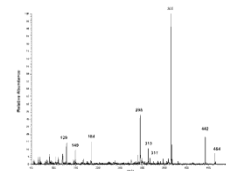
Échantillons et source DESI



Impact d'un jet de gouttelettes chargées provenant de la source DESI (flèches blanches) et libération des molécules ionisées de la surface de l'échantillon vers l'entrée du spectromètre de masse (flèches roses)



Représentation 3D de la cellule « Orbitrap »



Exemple d'un spectre de masse

**Différentes sources d'ionisation sont utilisées pour des échantillons sous différentes formes physiques :**

- **Sous forme gazeuse** : Impact électronique (EI) ; Ionisation chimique (CI)
- **Sous forme liquide** : Electrospray (ESI) ; Ionisation chimique à pression atmosphérique (APCI)
- **Sous forme solide** : Desorption Electrospray Ionization (DESI) ; Direct Analysis in Real Time (DART)

**Qu'est-ce que la haute résolution ? C'est ce qui permet l'accès à la masse exacte**

**Masses exactes de différents ions :**

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| $\text{CO}^+$            | 27,9949 u |
| $\text{N}_2^+$           | 28,0062 u |
| $\text{CH}_2\text{N}^+$  | 28,0187 u |
| $\text{C}_2\text{H}_4^+$ | 28,0312 u |

Les ions de même masse nominale ( $m/z$  28) se distinguent par leur masse exacte.



## CONCLUSION

La nécessité de détecter et de caractériser avec toujours plus de précision des éléments chimiques dans des échantillons toujours plus petits a été une incitation forte pour améliorer les performances des dispositifs d'analyse.

En soixante ans, le gain en sensibilité en analyse élémentaire a été supérieur à 6 ordres de grandeurs : nous sommes passés du micro au femtogramme, avec une sélectivité accrue du même ordre de grandeur.

En analyse moléculaire, l'accès à la haute résolution et à de nouveaux modes d'ionisation a permis la détection univoque de la structure de molécules, sans limitation de gamme de masse. La mesure très précise de la masse des molécules détectées permet même de déterminer leur composition isotopique. Mais il faut encore progresser.

Dans trente ans, l'objectif est d'être capable de détecter l'atome et la molécule...





# PROCÉDÉS ET MATÉRIAUX

**un savoir-faire spécifique**



***D'abord une évidence : tout objet doit être fabriqué avec d'autant plus de soin qu'on exige de lui des performances élevées, une grande résistance et de la durabilité. Cette exigence est encore plus forte pour les têtes nucléaires, qui doivent, pour garantir leurs performances, être fabriquées selon des procédés spécifiques et complètement maîtrisés.***

## PROCÉDÉS ET MATÉRIAUX : UN SAVOIR-FAIRE SPÉCIFIQUE

La maîtrise des procédés de fabrication des matériaux entrant dans la composition d'une tête nucléaire passe par la connaissance de leurs effets sur les propriétés de ces matériaux. Elle bénéficie largement de la complémentarité des compétences dans les domaines de la mécanique, de la métallurgie, de la chimie et de l'apport de la modélisation multiéchelles (voir « *Du microscopique au macroscopique, maîtriser et relier les échelles* »). Nous montrerons sur quelques exemples comment la modélisation guide la conception des matériaux et aide à maîtriser les procédés de fabrication.

La résistance aux agressions et aux environnements hostiles (voir « *Résister à tous les environnements* »), le haut niveau de performance requis, par exemple en termes d'invisibilité radar (voir « *Rendre les objets invisibles* »), ne peuvent se concevoir sans développement de matériaux innovants. Ces matériaux, aux propriétés spécifiques, doivent pouvoir être mis en forme de manière parfaitement maîtrisée et reproductible dans le temps.

Tout comme la tête nucléaire, les équipements constitutifs des grandes installations expérimentales du programme Simulation subissent eux aussi des sollicitations extrêmes. Ainsi, dans le laser Mégajoule (voir « *Produire la matière en conditions extrêmes et la sonder* »), les flux à la surface des optiques atteignent  $10^9$  W/cm<sup>2</sup> en fin de chaîne.

Propager des flux aussi intenses, éviter des réflexions parasites aux différentes interfaces optiques rencontrées par les faisceaux le long de leur propagation, puis les concentrer sur une cible millimétrique, demande des optiques d'une qualité extrême.

En outre, les exigences sur les édifices expérimentaux eux-mêmes sont elles aussi croissantes. Poussés par la complexité des phénomènes physiques que les scientifiques veulent simuler plus finement, les édifices expérimentaux deviennent de plus en plus complexes à construire et à caractériser. Mais les équipes de la DAM ont relevé le défi !

### /// *La métallurgie au service de la dissuasion*

De nombreux métaux, dont le choix est fortement contraint par la physique, sont utilisés dans les divers composants de la tête. L'exigence d'un très haut niveau de sûreté et de fiabilité de ces composants conduit à des exigences sur leurs propriétés chimiques, métallurgiques et mécaniques particulièrement fortes, qui doivent être respectées en tous points, non seulement à la livraison du composant mais également pendant toute sa durée de vie.

Or les procédés initiaux d'élaboration du matériau ainsi que les traitements thermomécaniques ultérieurs subis lors de la fabrication ont un fort impact sur cette double exigence d'homogénéité dans l'espace et de pérennité dans le temps.

La structure du matériau obtenu dépend en effet de façon cruciale de son histoire thermique, qui gouverne la nature des phases présentes, c'est-à-dire sa structure cristallographique, la croissance, donc la taille des grains, la diffusion des espèces, ou a contrario, leur démixtion (à savoir leur séparation en différentes phases), avec formation éventuelle de précipités.

La relation entre histoire thermique et structure du matériau est l'essence même de la métallurgie. Cette science, restée longtemps empirique, a gagné elle aussi en fiabilité grâce à la modélisation, qui repose sur de nombreuses expériences. Illustrons la démarche avec deux exemples de métallurgie des aciers inoxydables, avant de nous intéresser à un matériau plus spécifique de nos applications : le plutonium.

### **Granulométrie des aciers inoxydables**

La métallurgie dite numérique monte en puissance avec le développement d'outils qui permettent d'aborder la simulation de l'évolution des microstructures pendant les traitements thermomécaniques, avec une description explicite de cette microstructure, détaillant chaque grain.

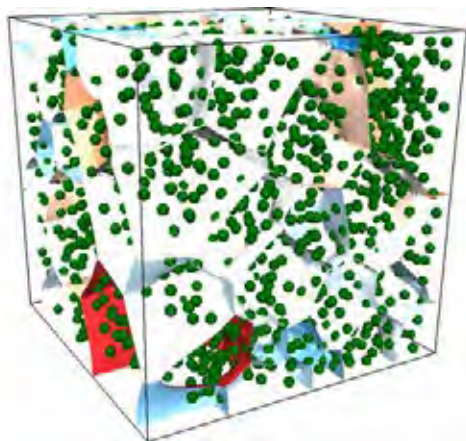
La DAM contribue largement à ces avancées, en participant au développement de l'outil (dit en champ complet) DigiMu<sup>1</sup>, primé au Forum Teratec en juin 2017.

<sup>1</sup> Cet outil a été mis au point dans le cadre de la chaire industrielle DigiMu, piloté par le Centre de Mise en Forme des Matériaux à Sophia Antipolis.





La figure 1 montre les résultats obtenus avec cet outil sur la simulation de la croissance de grains.



**Figure 1 :** calcul d'une croissance de grains en présence de particules d'une seconde phase ayant tendance à ralentir la migration des joints de grains.

## Précipitation dans les aciers au Niobium

Un acier allié<sup>2</sup> comporte plusieurs phases, dont la stabilité est gouvernée par la température et la concentration en éléments d'alliage. Lors de l'élaboration d'un matériau, des zones peuvent localement s'enrichir (un exemple de démixtion) en éléments d'alliage, provoquant la précipitation de phases à la composition spécifique.

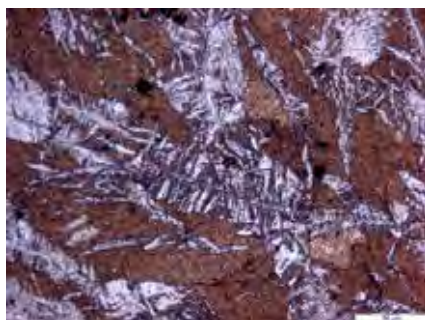
Par exemple, une phase dure Fer Chrome (dite  $\sigma$ ), néfaste pour les caractéristiques mécaniques d'un acier à hautes performances, précipite dans certaines conditions. L'utilisation de la simulation thermométallurgique, associée à la simulation de la diffusion des éléments chimiques, a permis de bien comprendre les conditions d'apparition de la phase  $\sigma$  et de s'en prémunir.

## Structure des alliages de plutonium

La phase cristallographique stable d'un matériau dépend de la température<sup>3</sup>. Des changements de phase se produisent donc par exemple quand le matériau est refroidi jusqu'à la température ambiante. Or les éléments d'alliage occupent dans chaque phase, à l'équilibre, des positions spécifiques.

Si la transformation est rapide, à la suite d'un refroidissement brutal, les éléments d'alliage n'ont pas le temps de diffuser et restent dans les positions occupées dans la phase initiale. On parle de transformation martensitique.

Sur le plutonium allié, la simulation, calibrée sur les données disponibles, permet d'explorer des domaines encore inaccessibles à l'expérience. Elle fournit une meilleure compréhension des mécanismes complexes mis en œuvre lors des transformations de phases martensitiques dans les alliages de plutonium (Figure 2).



**Figure 2 :** Exemple de morphologie de la martensite formée à basse température (-20°C) dans un alliage de plutonium.

La simulation est le complément idéal des caractérisations par dilatométrie<sup>4</sup> et diffraction des rayons X.

Passons maintenant à un procédé essentiel, qui permet d'assembler entre elles des pièces : le soudage.

## Modélisation du soudage

Les modélisations thermohydrauliques et thermométallurgiques du soudage en affinent l'interprétation physique et permettent donc une maîtrise accrue du procédé, par la prévision des phases métallurgiques observées *a posteriori* dans les opérations de soudage.

On peut ainsi prévoir la structure et les propriétés mécaniques de la zone soudée, et adapter le procédé pour les optimiser. Demain, des simulations toujours plus réalistes permettront de déterminer, avec une précision accrue, l'effet des paramètres des processus de soudage, et de les piloter pour obtenir des soudures systématiquement exemptes de défauts et présentant des caractéristiques mécaniques optimales.

## Usinage de précision

Le bon fonctionnement des armes nucléaires nécessite une qualité irréprochable de réalisation, et en particulier une très bonne maîtrise de l'usinage des pièces élémentaires les constituant. Il faut en même temps respecter des précisions dimensionnelles de l'ordre de quelques microns, et obtenir un excellent état de surface, avec des rugosités d'au plus une fraction de micron.

Pour atteindre ce niveau de qualité, le Centre CEA - Valduc a mis au point et développé un procédé de tournage parfaitement adapté aux pièces de révolution que nous devons réaliser.

Des études sur la coupe des différents matériaux usinés sont ainsi effectuées, afin d'optimiser la formation du copeau, maîtriser l'usure des outils et minimiser les défauts microgéométriques des surfaces usinées (stries, arrachements...). Afin de réduire les défauts macrogéométriques de ces surfaces (écarts de forme, de position et d'ondulation), des tours à commande numérique de haute précision sont développés avec des constructeurs de machines en vue d'améliorer la maîtrise de la trajectoire des outils en cours d'usinage. De plus, des instruments de mesure fiables et sensibles équipent ces tours, pour obtenir un contrôle rigoureux du processus d'usinage.

<sup>2</sup> Un acier allié est un acier qui contient une quantité significative d'éléments d'alliage, autres que le carbone et les teneurs couramment admises en manganèse, silicium, soufre et phosphore ; ces éléments sont ajoutés pour donner à l'alliage les propriétés mécaniques et physiques souhaitées.

<sup>3</sup> Par exemple, dans les aciers, la structure cubique faces centrées est stable à haute température, la structure cubique centrée est stable à température ambiante. Le refroidissement rapide d'un acier conduit à la formation de martensite. La martensite est cubique centrée, mais les éléments d'alliage y occupent les positions qu'ils avaient dans la phase cubique à faces centrées, distordant le réseau cristallin et rendant cette phase dure et cassante.

<sup>4</sup> La dilatométrie est une technique qui permet de mesurer une dimension d'une substance sous une charge négligeable (par exemple la dilatation ou le rétrécissement) en fonction de la température pendant que la substance est soumise à un programme de température contrôlée dans une atmosphère spécifique.



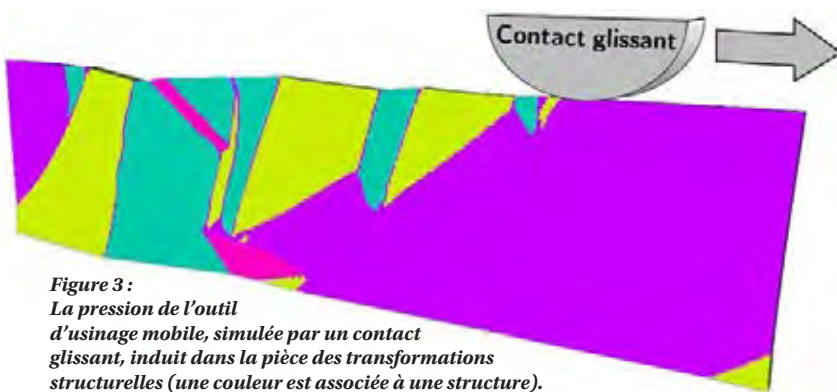
Nos outils de simulation multi-échelle (voir « *Du microscopique au macroscopique : maîtriser et relier les échelles* ») nous permettent, comme illustré sur la figure 3, de prévoir les transformations structurelles induites par l'usinage, et ainsi de déterminer l'état du matériau usiné : à terme, ces simulations nous aideront à optimiser encore plus nos procédés.

## Matériaux innovants pour le corps de rentrée

Le « corps de rentrée » d'une tête nucléaire, conçu à la DAM et fabriqué en partenariat avec des industriels, correspond à l'enveloppe externe de l'objet. Ce corps doit assurer les fonctions principales de protection thermomécanique et de durcissement (voir « *Résister à tous les environnements* ») mais aussi de discrétion de la tête nucléaire (voir « *Rendre les objets invisibles* »).

Une telle enveloppe est constituée de différentes couches de matériaux qui assurent un ensemble multifonctionnel devant répondre à ces sollicitations spécifiques, le plus souvent, en conditions extrêmes.

C'est en utilisant une démarche de conception de nouveaux matériaux que nos ingénieurs et techniciens ont imaginé la création de « clones numériques » des matériaux afin d'optimiser leur conception en menant des expériences purement numériques, moins coûteuses en temps, en main-d'œuvre et en investissement.



**Figure 3 :**  
**La pression de l'outil d'usinage mobile, simulée par un contact glissant, induit dans la pièce des transformations structurelles (une couleur est associée à une structure).**

Ainsi, depuis 2005, la DAM s'est engagée dans une conception de matériaux utilisant des outils numériques pour faire l'acquisition de leur structure et microstructure, afin de modéliser leur comportement thermique et mécanique, et explorer les limites de leurs propriétés grâce à des expériences virtuelles sur calculateurs. Les avantages de cette démarche : mieux comprendre les propriétés observées des matériaux grâce à l'utilisation numérique de leurs microstructures réelles et mener de nombreuses expériences sans moyens expérimentaux, uniquement par le calcul.

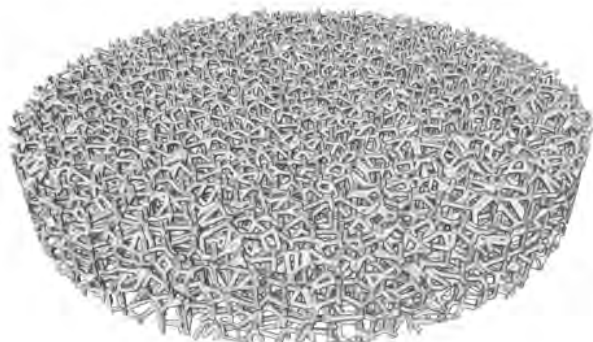
### Tout voir puis imprimer en 3D

Depuis quelques années, la science des matériaux vit une petite révolution avec le développement de moyens de caractérisation structurale capables de décrire en 3 dimensions l'organisation de la matière sur des volumes statistiquement représentatifs : microscopie électronique en transmission, microscopie électronique à balayage couplée au faisceau d'ions, tomographie X. Ainsi, en s'appuyant sur des techniques d'analyse d'image de plus en plus performantes, de nouvelles approches d'analyses microstructurales sont réalisées pour des échelles allant de quelques nanomètres au millimètre.

En parallèle, les capacités des moyens informatiques actuels (notamment les supercalculateurs) autorisent la réalisation « d'expériences numériques » qui permettent de modéliser les propriétés physiques des matériaux à partir de leurs volumes représentatifs numérisés.

En outre, au-delà de la recherche de propriétés des matériaux, ces simulations permettent aussi de concevoir, de manière virtuelle, une structure dont les performances (thermiques, mécaniques...) peuvent être optimisées en changeant la nature des constituants, leur arrangement spatial, leur morphologie... Le besoin de réalisation de ces matériaux apparaît alors. C'est dans ce contexte que les avancées de la fabrication additive (l'impression 3D) apportent leur contribution, d'une part en réalisant des échantillons de matériaux que l'on caractérise et que l'on teste pour valider les modèles numériques et, d'autre part, en réalisant *in fine* ces nouveaux matériaux selon une mise en forme et une microstructure optimisées pour le domaine d'emploi.

La figure 4 illustre le processus depuis la conception numérique 3D jusqu'à la réalisation d'objets réels en s'appuyant sur des simulations numériques.



Structure numérique



Structure mousse imprimée par stéréolithographie

**Figure 4 : Illustration de la démarche de fabrication par impression 3D d'un matériau optimisé numériquement.**





## Application de la démarche aux matériaux isolants haute température

La DAM applique d'ores et déjà cette démarche raisonnée pour le développement de nouveaux matériaux isolants thermiques de haute performance. En effet, les matériaux superisolants (matériaux ayant de meilleures propriétés thermiques que l'air) sont en général mécaniquement très fragiles. Afin d'améliorer leurs performances mécaniques sans dégrader leurs propriétés thermiques, l'utilisation d'un squelette solide élaboré par fabrication additive est étudié. Il permet de structurer mécaniquement le matériau tout en préservant le volume nécessaire pour réduire la propagation de la chaleur grâce à l'introduction d'un autre milieu (gaz, mousse, aérogel). Les simulations sont alimentées par des caractérisations locales effectuées sur des échantillons représentatifs, élaborés aussi par impression 3D. L'influence des paramètres de fabrication est également prise en compte dans les calculs.

Les techniques de fabrication additive privilégiées dans ces travaux sont compatibles avec l'élaboration de matériaux céramiques réfractaires : impression par projection de liant sur lit de poudre et stéréolithographie. Dans chaque cas, une formulation spécifique et innovante des matériaux précurseurs de céramiques est mise au point et évaluée. Puis la comparaison entre les simulations et les expériences permet d'itérer pour arriver au meilleur compromis entre propriétés thermiques et mécaniques.

## Maîtriser la lumière : procédés innovants pour les optiques du laser Mégajoule

Après cette vue quelque peu « impressionniste » de quelques techniques de fabrication de sous-ensembles de la tête, éloignons-nous de la matière et tournons-nous vers la lumière, plus précisément sur les moyens de maîtriser des flux intenses de lumière dans le laser Mégajoule (LMJ). Nous avons vu, dans l'article « *Produire la matière en conditions extrêmes et la sonder* », que le LMJ est capable de porter la matière à des densités et des tem-

pératures extrêmes. Pour y parvenir, il faut produire des flux lumineux intenses, puis les amener jusqu'à la chambre d'expérience, où ils sont concentrés (focalisés) sur une cible millimétrique.

Le LMJ est donc aussi un gigantesque instrument d'optique. Mais, à cause des flux de lumière très intenses, le moindre défaut résiduel d'une optique peut avoir des conséquences dramatiques sur sa tenue dans le temps : lorsqu'on parle des hublots de la chambre d'expériences de 10 mètres de diamètre sous vide, on imagine aisément les effets délétères qu'aurait une rupture d'un de ces hublots ! Il a ainsi fallu développer à la DAM, et en partenariat avec les industriels du domaine, des procédés spécifiques pour disposer d'optiques qui ne présentent quasiment aucun défaut. De même, afin d'éviter des réflexions parasites aux différentes interfaces optiques rencontrées par les faisceaux le long de leur propagation, des traitements antireflet performants, basés sur le procédé sol-gel, ont été développés. Deux exemples – le traitement antireflet par voie sol-gel des optiques, procédé mis au point à la DAM puis transféré chez un industriel prestataire, et la gravure des réseaux de diffraction, adapté d'un procédé industriel pour le LMJ – sont tout à fait emblématiques de cette démarche.

### Des optiques traitées antireflets

Lors de son passage à travers une interface diélectrique, la lumière est partiellement réfléchi. Ce phénomène est gênant, par exemple sur les verres de lunettes, qui, sans traitement particulier, génèrent des reflets. D'ailleurs, ces antireflets, qui doivent être efficaces sur tout le spectre visible, expliquent en partie le prix des verres...

Le but d'un traitement antireflet est, en recouvrant le verre d'une couche d'indice bien choisi, d'obtenir un faible coefficient de réflexion. Sur les optiques du LMJ, l'effet est double : on transmet le maximum de lumière pour ne pas perdre d'énergie, et on évite aussi de renvoyer de la lumière dans le sens inverse de la propagation. L'idée la plus naturelle est de déposer une couche d'indice intermédiaire entre l'indice du verre et celui du milieu extérieur (air ou vide dans notre cas). Les dépôts sont réalisés par une méthode de chimie dite douce : le procédé sol-gel.

Dans ce procédé, les particules nanométriques de silice sont en solution et viennent former à la surface de l'optique une couche poreuse et fragile, qu'il faut ensuite densifier. Le laboratoire sol-gel du Centre CEA - Le Ripault a développé une forte expertise dans le développement de revêtements optiques sol-gel pour laser. Le procédé permet d'obtenir des revêtements antireflets performants et résistants à l'abrasion et aux flux de lumière intenses.

Ce besoin de résistance à des flux intenses de lumière a nécessité le développement d'instruments de mesure optique très spécifiques. Les opticiens du CEA/DAM ont mis au point des moyens de mesure adaptés aux phénomènes physiques qui entrent en jeu lorsque des composants optiques sont soumis à des faisceaux laser de forte puissance. Cette métrologie laser unique est aujourd'hui indispensable au bon fonctionnement et à la maîtrise du coût d'exploitation du laser Mégajoule. En outre, le laboratoire a étendu le champ d'application de ce procédé à d'autres domaines, dont les revêtements et matériaux dans les nouvelles technologies pour l'énergie : cellules solaires et piles à combustibles. Les travaux sur les optiques laser bénéficient à la transition énergétique !

### Focaliser la lumière

Le laser Mégajoule concentre l'énergie de ses faisceaux, chacun de plusieurs décimètres de côté, sur des cibles millimétriques (dont nous parlerons plus loin). Pour obtenir un tel niveau de concentration, il faut focaliser efficacement la lumière. Nous utilisons pour ce faire des réseaux de diffraction. Le concept de focalisation par réseau pour laser de puissance est né à la DAM. Un réseau de diffraction est un dispositif optique qui comporte une série de traits ou motifs parallèles dont la période est proche de la longueur d'onde incidente.

Sous l'effet de la diffraction, le réseau disperse chaque longueur d'onde (en somme chaque couleur) de la lumière dans des directions discrètes de l'espace dont l'orientation dépend de la longueur d'onde incidente, de la période du réseau et de l'incidence.

Ces réseaux sont des pièces de près d'un demi-mètre de côté, structurées à une échelle de l'ordre de la longueur d'onde, soit 351 nanomètres pour la lumière de fin



Figure 5 : Réseau de transmission gravé dans la silice.

de chaîne, obtenue par triplement de fréquence de la lumière initiale (Figure 5). Le réseau de fin de chaîne du LMJ, focalisant la lumière ultraviolette, est donc le plus finement structuré, avec plus de 2 400 traits par millimètre (Figure 6) ! De plus, les traits de ce réseau doivent être courbes pour assurer, un peu comme une lentille, la focalisation. Structurer périodiquement un composant optique à une échelle submicrométrique sur des échelles semi-métriques est l'un des plus grands défis des nanotechnologies.

L'utilisation de techniques d'enregistrement lithographique couplée à une étape de gravure sèche a permis la production des premiers composants par les fabricants. Et c'est en utilisant des moyens de caractérisation à l'échelle du motif périodique (microscopie à force atomique, microscopie électronique à balayage) ou du composant optique (interférométrie pleine pupille ou par sous pupille) que le procédé d'enregistrement est modifié pour répondre aux exigences de planéité visées.

Le motif périodique d'un réseau peut aussi être pollué par des résidus de fabrication. L'optimisation de la forme et de la propriété des motifs submicrométriques est donc au cœur de la bonne résistance au flux de cette optique diffractive.

Nous avons vu sur deux exemples les techniques sophistiquées de fabrication des optiques du LMJ. Nous allons maintenant nous intéresser à des objets beaucoup plus petits, mais aussi d'une grande importance : les cibles pour le LMJ.

## /// Fabrication de microcibles

Utilisées comme édifices expérimentaux sur les installations laser, les micro-cibles sont conçues, développées et réalisées à la DAM depuis plusieurs décennies. Elles sont extrêmement petites et complexes. Elles nécessitent toutes sortes de matériaux, dont certains très fragiles, qu'il faut néanmoins être capable de mettre en forme selon les besoins des physiciens et avec des tolérances de fabrication extrêmement réduites (de l'ordre du micron).

Tout cela requiert le développement de technologies adaptées pour la réalisation des pièces individuelles, la mise au point de procédés d'assemblage sophistiqués pour répondre au cahier des charges, ainsi que le développement de techniques de métrologie adaptées à la petitesse des édifices et à la précision demandée.

En somme, la fabrication des cibles est hautement multidisciplinaire et regroupe au sein d'une même unité des experts de domaines très variés (synthèses, mise en forme de matériaux, assemblage, caractérisation...). Les objectifs des expériences de physique sur le LMJ sont bien sûr multiples, ce qui conduit à plusieurs types de cible. Mais résistant à la tentation, nous nous limiterons à une cible emblématique, représentée sur la figure 7, destinée à la réalisation d'expérience de fusion de deux

isotopes de l'hydrogène, deutérium et tritium (voir « Comprendre la structure du noyau et ses interactions pour en extraire l'énergie »).



Figure 7 : Cible destinée à la réalisation sur le LMJ d'une expérience de fusion de deux isotopes de l'hydrogène (deutérium et tritium).

Cette cible est composée d'une cavité dite de conversion bi-matériaux (or et résine plastique). Cette cavité, longue de quelques centimètres, est réalisée en usinage d'ultraprécision, c'est-à-dire sur des machines spécifiques d'usinage à grande vitesse avec des outils diamant (la tolérance de fabrication est inférieure à 10 µm).

Cela permet ensuite d'assembler les différentes pièces de la cavité par clipsage. Les pièces sont ainsi quasi parfaitement alignées et les cotes internes beaucoup plus précises.

Dans la cavité, on retrouve un microballon en plastique (observable par les trous de diagnostic) de diamètre de l'ordre du millimètre et d'épaisseur de paroi de quelques dizaines de microns (l'équivalent de l'épaisseur d'un cheveu). Ce ballon, rempli d'un mélange de deutérium et de tritium, est destiné à être implosé sur le LMJ (voir « Produire la matière en conditions extrêmes et la sonder ») afin de produire des réactions de fusion (voir « Comprendre la structure du noyau et ses interactions pour en extraire l'énergie »).

Il doit être une sphère aussi parfaite que possible : toute imperfection est violemment amplifiée pendant l'implosion et dégrade fortement le rendement de la réaction. Un procédé spécifique en plusieurs étapes a dû être inventé.

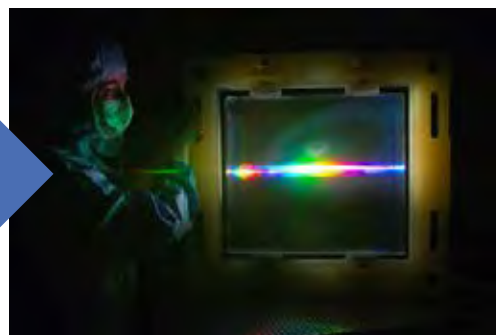
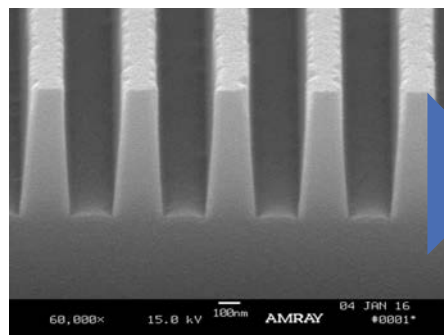


Figure 6 : Réseau de transmission du LMJ - image MEB (gauche) optique dans son cadre de transport (droite).





Voyons d'un peu plus près comment ce microballon est fabriqué et contrôlé (Figure 8). On réalise d'abord par voie chimique des mandrins PAMS (poly-alpha-méthylstyrene) qui servent de forme de départ (de la même manière que l'on réalise des bulles de savon mais avec une maîtrise parfaite de la chimie et des dimensions). Ces derniers sont ensuite recouverts de plastique (CH) par polymérisation plasma, puis ils sont éliminés par dépolymérisation du PAMS. En effet, le PAMS a été choisi car il se décompose à basse température, ce qui permet de l'éliminer sans dégrader le plastique obtenu par polymérisation plasma. Chaque microballon ainsi obtenu est ensuite assemblé dans la cavité de conversion (maintenu entre des membranes plastiques de  $0,1 \mu\text{m}$  d'épaisseur).

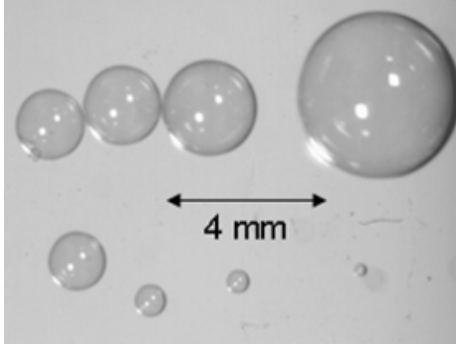


Figure 8 : Microballons de plastique destinés aux expériences sur le LMJ.



La rugosité de surface est mesurée sur le Spheremapper, qui repose sur la technique de microscopie à force atomique (Figure 9).

À noter que le microballon est maintenu par aspiration, et qu'une micropointe vient palper sa surface le long de différents équateurs, ce qui permet d'obtenir des informations essentielles sur la rugosité de surface et la forme du microballon à quelques nanomètres près. Ces données sont essentielles pour interpréter l'expérience.

L'édifice complet assemblé doit également être finement caractérisé.

Le développement de techniques de caractérisation tridimensionnelles prend un essor considérable, notamment avec la tomographie X qui permet de reconstruire numériquement une cible entière et de mesurer des cotes non observables avec les techniques conventionnelles.

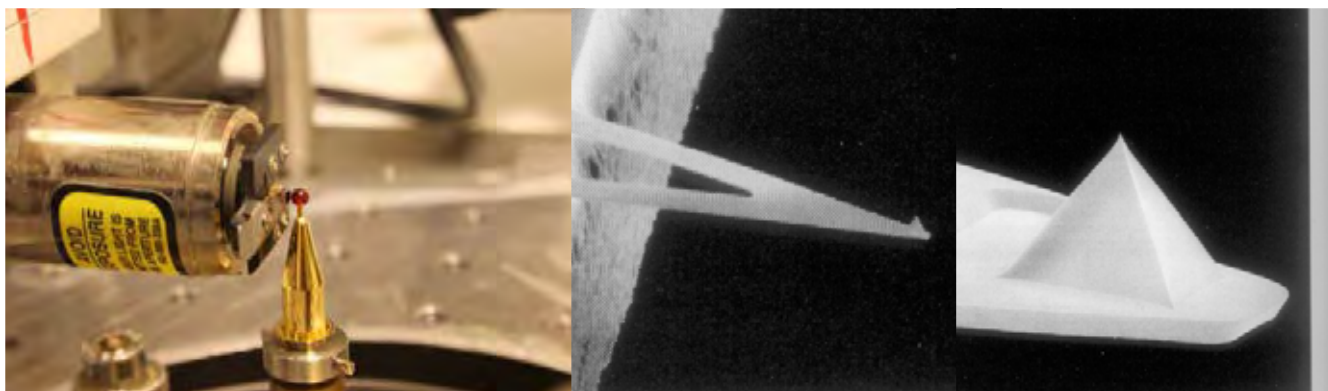


Figure 9 :

(Photo de gauche) Mesure de la rugosité de surface du microballon par le Spheremapper.  
(Photo de droite) Micropointe qui sert à palper la surface du microballon.



## CONCLUSION

Cet article est une courte visite guidée du savoir-faire de la DAM en procédés et matériaux, dans le respect des exigences de notre mission. Nous n'avons pas cherché l'exhaustivité, renvoyant le lecteur intéressé au numéro « Procédés et matériaux » de la revue Chocs, (numéro 42, paru en novembre 2012).

Que se passera-t-il dans les dix ans à venir ?

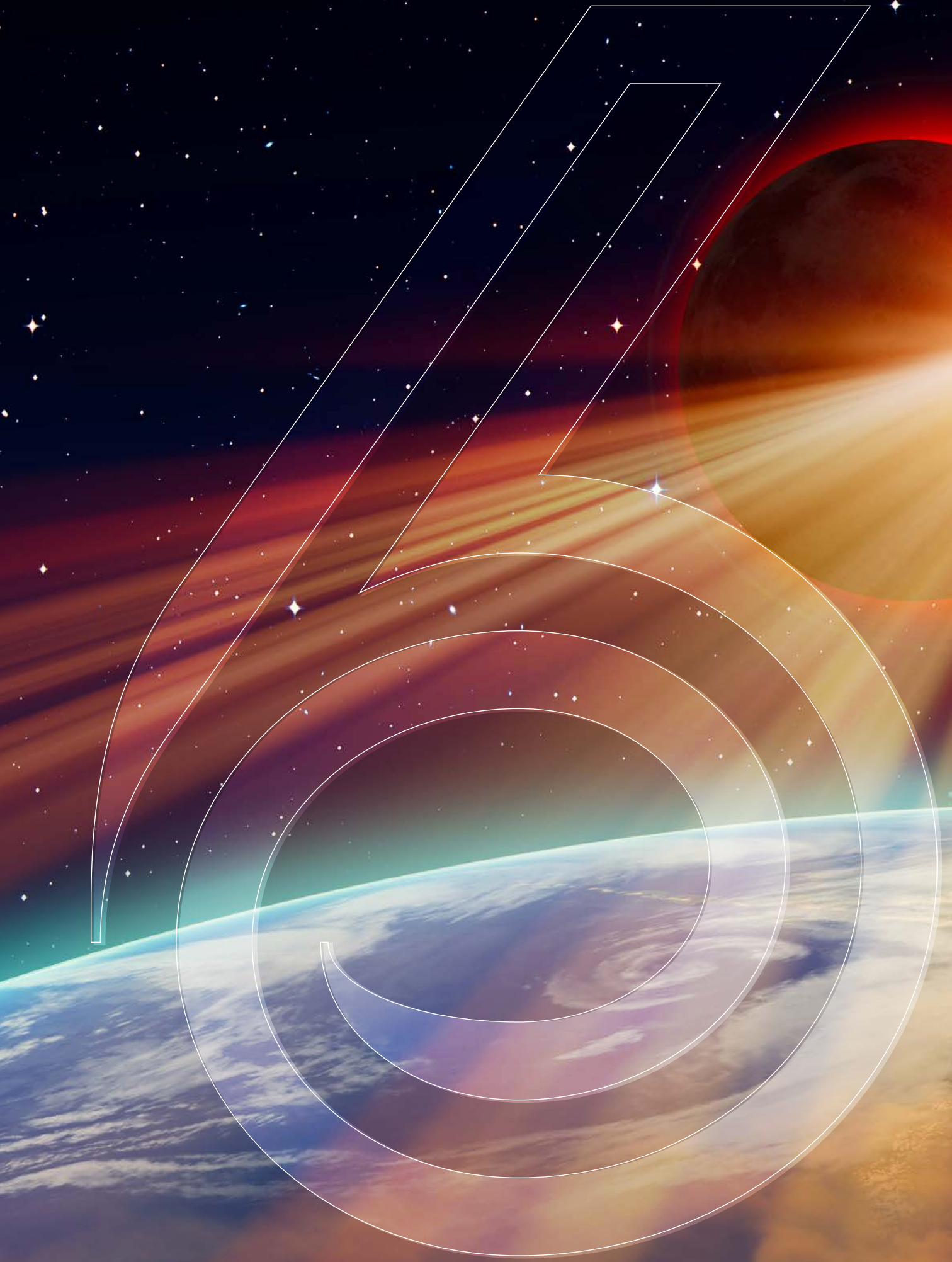
La maîtrise des procédés de fabrication va progresser grâce à une métallurgie numérique encore plus précise, et les avancées apportées par le couplage des matériaux numériques et de la fabrication additive vont se concrétiser.

En outre, l'utilisation de la nanostructuration, dont les réseaux de diffraction sont un bel exemple, permettra de concevoir des matériaux aux propriétés nouvelles.

Ces défis du futur seront relevés grâce à l'ingéniosité des ingénieurs, des chercheurs et des techniciens de la DAM, à leur motivation et aux moyens d'exception mis à leur disposition.

Gageons que les techniques développées déborderont du cadre d'origine et irrigueront l'industrie en procédés innovants.









# Direction des Applications Militaires

