

> sur des vecteurs efficaces, missiles, avions et sous-marins à propulsion nucléaire. Ces derniers sillonnent toutes les mers du globe, indétectables mais prêts à riposter si nécessaire. La sécurité de la France passe aussi par la lutte contre la prolifération nucléaire. Il s'agit en particulier de surveiller que tous les pays signataires du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Tice) le respectent bien... Car, depuis 1996, la France et les autres nations ayant ratifié le Tice se sont engagées à ne plus réaliser de tels essais.

Ce traité international a par ailleurs littéralement révolutionné la DAM dans sa façon de travailler et de remplir sa mission: ne pouvant plus se fonder sur les essais nucléaires pour mettre au point les armes tout en garantissant leur fiabilité et leur sûreté, la DAM a lancé, il y a un peu plus de vingt ans, le programme Simulation. Au départ, pour concevoir la charge nucléaire, la partie de l'arme qui délivre l'énergie. Bien sûr, sans essai nucléaire réel, assurer son fonctionnement et sa sûreté prend une

pour être résolues sur un ordinateur très puissant. Il consiste d'autre part à tester les prévisions de chaque phénomène modélisé par des expériences en laboratoire. Par exemple, on vérifie le comportement de matériaux sous très haute pression dans un dispositif nommé «cellule enclume diamant». Les expériences, contrairement aux essais réels, ne testent pas le fonctionnement complet d'une charge nucléaire, mais des étapes, des parties. Les modélisations numériques de ces étapes sont mises bout à bout dans un code de calcul pour simuler le fonctionnement complet.

La DAM dispose du calculateur le plus puissant en France, le 14^e mondial

Comme la simulation repose sur d'énormes calculs, depuis plus de vingt ans, la DAM s'est dotée des machines parmi les plus performantes du monde grâce à une démarche de codesign avec Bull (aujourd'hui au sein d'Atos). Le site de Bruyères-le-Châtel abrite ainsi la machine Tera-1000, le plus puissant ordinateur en France, le quatorzième au niveau mondial en termes de performance. Yoccoz – c'est son surnom – dispose d'une puissance maximale de 25 petaflops, c'est-à-dire qu'il peut réaliser 25 millions de milliards d'opérations par seconde.

Mais toute la puissance de calcul n'est pas réservée à la dissuasion! Dans le Très grand centre de calcul de la DAM, le TGCC, où se trouvent d'autres superordinateurs, elle est mise à disposition de la communauté scientifique académique, ainsi que des entreprises privées. Une quarantaine de partenaires industriels s'appuient ainsi sur les moyens de calcul du TGCC. De nombreux secteurs de l'industrie sont impliqués: aéronautique et spatial, automobile, énergie, pour n'en citer que quelques-uns, mais aussi le groupe L'Oréal, qui utilise le calcul intensif pour la conception de cosmétiques.

DES ARMES INVISIBLES AUX RADARS

À la DAM, le programme Simulation s'est aussi étendu à toutes les fonctions de la tête nucléaire, pour la conception et l'assemblage des matériaux qui la composent, pour sa précision, pour sa rentrée dans l'atmosphère... Et pour sa furtivité, un atout essentiel: «Une arme, précise Daniel Bouche, doit être capable de remplir sa mission quelle que soit l'évolution des défenses adverses, et ainsi ne doit pas être détectée puis détruite en plein vol. Elle doit donc être furtive, c'est-à-dire invisible aux radars, sinon la crédibilité de la dissuasion s'effondrerait!» Pour atteindre cet objectif, «la DAM a considérablement amélioré son programme Simulation pour la furtivité, et c'était un défi qui, à l'époque, sortait largement des sentiers battus de la science», précise avec fierté François



LE SUPERCALCULATEUR TERA-1000

peut réaliser jusqu'à 25 millions de milliards
d'opérations par seconde.

autre tournure. Daniel Bouche, directeur de recherche à la DAM, l'explique bien: «Avant, on construisait des armes totalement optimisées en termes de masse et d'encombrement parce qu'on les testait en réel. C'était un travail d'orfèvre. Maintenant, on conçoit des armes plus «robustes», dont on garantit le fonctionnement et la sûreté par la simulation. En somme, on est passé de la conception de «Formule 1» au développement de véhicules tout-terrain optimisés.»

Plus précisément, le programme Simulation consiste d'une part à modéliser les phénomènes physiques par des équations mathématiques, puis à traduire ces dernières en langage numérique («code»)

Les expériences de physique permettent de valider ces modélisations. «Le code, qui traduit en langage informatique les formules mathématiques de la modélisation, n'est qu'un intégrateur que des physiciens, avec leur expertise et les résultats des expériences, utilisent pour concevoir et garantir l'arme... ajoute Laurence Bonnet, directrice scientifique de la DAM. L'ingénierie des armes et les savoir-faire acquis à la DAM depuis de nombreuses années sont primordiaux. De plus, nous utilisons notre «trésor de guerre», à savoir les données issues des anciens essais nucléaires, sans lesquelles nous ne pourrions pas valider globalement les simulations et garantir la sûreté et la fiabilité des armes.»

Geleznikoff. Aujourd'hui, la furtivité est un des domaines de la DAM (avec la conception de la charge nucléaire et des matériaux) qui nécessite le plus de simulations, et donc le plus de calculs intensifs.

Comme l'objectif est de faire en sorte que les armes nucléaires françaises soient invisibles aux radars, les codes de calcul modélisent l'interaction des ondes électromagnétiques (émises par les radars) avec les matériaux constituant les couches externes de la tête nucléaire.

«Plusieurs étapes sont ainsi nécessaires à la conception d'une arme furtive, explique Paula Aguilera, jeune ingénieure-chercheuse. D'abord, j'estime tous les phénomènes physiques ou toutes les contraintes, par exemple thermomécaniques, qui entrent en jeu, puis je les modélise «un par un» et lance les calculs sur des ordinateurs de bureau, qui n'ont alors pas besoin de réaliser trop d'opérations à la seconde.» S'ensuit la phase de faisabilité où chaque modèle est testé expérimentalement avec des maquettes, et ensuite la phase de «définition», où le code complet du matériau en entier est précisément calculé. Et c'est à ce moment-là qu'il est nécessaire de disposer d'un ordinateur puissant: Paula Aguilera et ses collègues travaillent avec la machine Tera-1000. Enfin, si le résultat de la simulation démontre que la tête est bien furtive, le matériau est produit à l'aide de procédés de fabrication adaptés.

DES APPLICATIONS CIVILES ISSUES DE LA MISSION DÉFENSE

La production d'armes nucléaires sûres et fiables est une mission de la DAM, mais ce n'est pas la seule. Il s'agit aussi, comme on l'a vu, de lutter contre la prolifération nucléaire. Pour remplir cette mission, certains scientifiques «cherchent une aiguille dans une botte de foin», c'est-à-dire qu'ils recherchent des traces de matériaux entrant dans la composition des armes nucléaires sur des sites où l'on soupçonne par exemple une activité clandestine (voir l'encadré ci-contre). D'autres surveillent le globe en permanence... L'objectif: détecter les ondes engendrées

À LA RECHERCHE D'INDICES DE PRÉSENCE NUCLÉAIRE

Depuis plus de vingt ans, la DAM participe activement à la lutte contre la prolifération nucléaire, notamment en développant de nouveaux moyens de détection chimique. Ainsi, certaines de ces techniques de pointe sont régulièrement mises en œuvre en soutien à l'Agence internationale de l'énergie atomique (IAEA), dont le siège se situe à Vienne, en Autriche. L'IAEA a pour mission de vérifier et contrôler l'application des accords de garanties de non-prolifération nucléaire établis avec les États membres signataires du Traité de non-prolifération (TNP). Dans ce cadre, les inspecteurs de l'IAEA réalisent des prélèvements de particules micrométriques en frottant la surface de matériels ou de murs avec des échantillons en coton appelés «frottis». Les caractérisations moléculaires et isotopiques de ces particules microscopiques constituent des indices permettant d'identifier une installation industrielle suspecte et d'en préciser les activités. Puis les frottis sont envoyés à l'un ou l'autre de la dizaine de laboratoires hautement spécialisés sur lesquels s'appuie l'IAEA et dont fait partie le laboratoire d'expertise analytique de la DAM. Ce dernier réalise deux catégories d'expertise à partir des frottis. Les premières ont pour objectif de rechercher et mesurer des «observables» inorganiques comme la composition isotopique et la forme physicochimique des particules d'uranium, qui sont des indices précieux pour identifier



MAXIME BRIDOUX

le procédé mis en œuvre. Les secondes permettent de détecter des traces infimes de molécules organiques, spécialité de Maxime Bridoux, ingénieur-chercheur au CEA depuis 2012 et expert en analyse moléculaire. Ainsi, Maxime Bridoux traque des substances intervenant dans la fabrication des armes nucléaires, comme des explosifs, des polymères, des additifs, des diluants... «Dans un laboratoire de chimie organique classique, les molécules d'un échantillon, comme le frottis, sont extraites à l'aide de solvants, puis injectées en tête de colonne chromatographique pour être séparées et analysées par spectrométrie de masse, explique Maxime Bridoux. Mais nous, pour identifier directement les substances à la surface du frottis, nous développons des méthodes innovantes qui permettent "d'ioniser" les molécules directement à la surface des frottis, sans séparation chromatographique ni utilisation de solvants. Nous cherchons donc des indices

directement à la surface de n'importe quel solide, en quelques minutes, et détectons des quantités infimes, de l'ordre du nanogramme (milliardième de gramme).» Maxime Bridoux et ses collègues collaborent également avec le Laboratoire central de la préfecture de police de Paris, notamment pour identifier des explosifs après des attentats par exemple. Car la signature isotopique des composants des explosifs permet de déterminer l'origine de l'engin explosif et parfois de remonter les filières.

par des explosions nucléaires. Et là encore, il s'agit de trouver le bon signal au milieu d'un bruit de fond ambiant très intense.

Hélène Hébert travaille à la DAM à la détection de ces ondes, mais pour une autre application importante: l'alerte sismique et la prévision des tsunamis. Car dans le bruit de fond terrestre, se trouvent les ondes émises par les tremblements de terre (voir l'encadré page suivante). C'est donc pour les besoins de la dissuasion que sont disposés partout sur le globe des

détecteurs d'ondes, adaptés au type de signal que l'on cherche à capter: un sismographe est d'autant plus grand qu'il mesure un signal basse fréquence. Même le grand public participe: une hausse du trafic sur le site Web du Centre sismique euro-méditerranéen ou du nombre de tweets contenant le mot séisme sont des indicateurs utiles. Et, dans quelques années, chacun pourra transmettre au réseau de surveillance terrestre les données de son sismographe personnel. Tout cela, afin de mieux >

LA DAM DU CEA EN CINQ DATES

1945

Naissance du CEA, le Commissariat à l'énergie atomique.

1958

Création de la DAM, la Direction des applications militaires, du pôle défense du CEA.

1996

Traité d'interdiction complète des essais nucléaires, le Tice, puis début du programme Simulation à la DAM.

2001

Installation du premier supercalculateur Tera-1 tournant à 5 teraflops.

2022

Acquisition d'un calculateur de plusieurs centaines de petaflops.

TSUNAMIS SANS FRONTIÈRES

« **U**n tsunami n'a pas de frontières... Et en 2004, à Sumatra, le monde entier en prend brutalement conscience. La simulation permet de prévoir de mieux en mieux les effets des séismes et donc définir les zones à évacuer mais, à cette période, cela concernait essentiellement le Pacifique. Le grand tsunami de l'Océan Indien, extrêmement destructeur, n'a pas du tout été anticipé, car il n'y avait absolument aucun système de prévention ni d'alerte dans cette région du monde. Très vite, à partir de 2005, les autorités nationales et internationales équipent alors de systèmes d'alerte tous les océans et les régions potentiellement exposés aux tsunamis », explique Hélène Hébert, experte tsunami à la DAM. En effet, la DAM a pour mission de détecter d'éventuelles explosions nucléaires, en isolant les ondes qu'elles émettent d'un bruit de fond terrestre intense. De sorte qu'une activité de protection civile est née de cette surveillance : la traque des séismes et l'évaluation de leurs effets potentiellement dévastateurs, comme les tsunamis. Cette observation et ces prévisions ont débuté dans le Pacifique dans les années 1960-1970. Mais après la catastrophe de Sumatra, naît à la DAM le Cenalt, le Centre national d'alerte aux tsunamis, où se trouve le laboratoire d'Hélène Hébert, sur le site de Bruyères-Châtel (en Essonne). Loin de la mer, ce centre surveille les séismes, évalue les variations des niveaux de la mer, et est responsable de l'alerte tsunami pour les côtes françaises métropolitaines. « Bien sûr, en Europe occidentale, le contexte n'est pas le même que dans le Pacifique et le risque de vagues dévastatrices bien moins grand, précise l'experte de la DAM. Mais l'histoire nous rappelle que des événements rares ne sont pas pour autant impossibles : en 1755, le séisme

TSUNAMI DÛ AU SÉISME D'ALGER EN 2003



HÉLÈNE HÉBERT

de Lisbonne, de magnitude certainement supérieure à 8, a produit un tsunami proche de celui de Sumatra, avec 5 mètres de vagues sur les Antilles françaises et des déferlantes moins importantes en Irlande, en Angleterre et probablement en France. Or les côtes étaient peu occupées à l'époque. Imaginez les dégâts humains et matériels qu'il y aurait aujourd'hui... ». Au quotidien, le Cenalt surveille en permanence, 7 jours sur 7, 24 heures sur 24, les ondes sismiques en Europe, notamment au large de Lisbonne, de l'Algérie et de Nice où se situent des zones sismiques. Et il échange ces données et savoir-faire avec tous les autres centres de prévention des pays voisins. Si un séisme se produit, le Cenalt envoie un message d'alerte en moins de 15 minutes avec les caractéristiques du séisme et les heures d'arrivée estimées du tsunami sur la côte. Une « matrice de décision » a été définie par les services de sécurité civile pour classer les tsunamis en catégorie rouge (risque d'inondation), orange (impact sur la côte) ou jaune (pas d'impact notable). Cette matrice permet de définir rapidement la dangerosité de l'événement en cours. La sécurité civile a alors moins d'une heure (par exemple si le séisme a lieu en Algérie) pour mettre à l'abri les populations.

> déterminer le lieu, la puissance et les conséquences d'un séisme: une forme de science participative.

D'autres dispositifs scientifiques de la DAM, aussi développés pour les besoins de la dissuasion, trouvent des applications civiles, dans la recherche académique et industrielle. C'est le cas par exemple du laser Mégajoule, conçu pour étudier, à très petite échelle, le comportement des matériaux dans des conditions extrêmes de

température et de pression, semblables à celles atteintes lors du fonctionnement nucléaire des armes. Mais ce dispositif a aussi considérablement musclé la filière optique, notamment pour le développement des traitements antireflets des verres, et est utilisé pour des expériences en astrophysique. « Un quart du temps d'utilisation du laser Mégajoule, précise François Geleznikoff, est dédié à la communauté scientifique internationale. »

Une autre réalisation grand public développée au départ pour la dissuasion par les scientifiques de la DAM (en collaboration avec la Direction des recherches technologiques du CEA) est l'électronique « durcie », c'est-à-dire qui résiste à tout type de rayonnements ou de perturbations électromagnétiques... Par exemple, des armes nucléaires pourraient être utilisées pour détruire les têtes nucléaires françaises sur leur trajectoire. Ces armes émettraient en effet des rayonnements, sous forme de photons ou de neutrons, susceptibles d'endommager l'électronique ou de compromettre le fonctionnement de la tête nucléaire. C'est pourquoi la France a conçu des composants électroniques résistants aux rayonnements. Cette électronique dite SoI – pour *Silicon on insulator*, silicium sur isolant – développée par la société Soitec, se retrouve partout : dans les téléphones portables, les satellites soumis au rayonnement solaire, les voitures...

UNE SCIENCE DE POINTE

Bien entendu, pour des raisons de secret-défense, les scientifiques de la DAM ne publient pas tous leurs travaux de recherche... D'autres États pourraient utiliser ces résultats pour développer leur armement nucléaire. Toutefois, les équipes de la DAM publient environ 400 articles scientifiques par an dans des revues à comité de lecture. « Depuis que nous ne pouvons plus faire d'essais nucléaires, le fait de publier certains de nos travaux, explique François Geleznikoff, est une bonne façon de montrer que nous sommes scientifiquement et techniquement au meilleur niveau mondial dans le domaine des armes nucléaires. Ce qui rend la dissuasion crédible. » D'autant que la DAM ne compte pas s'arrêter là. Les progrès en simulation sont réguliers. Aujourd'hui, on ne connaît pas encore parfaitement les forces d'interaction du noyau, qui pourtant sont essentielles pour comprendre et contrôler au mieux la fusion et la fission nucléaires. Mais avec l'augmentation de la puissance de calcul, les ingénieurs espèrent simuler des « objets » de plus en plus volumineux, tout comme ils simuleront avec une précision accrue le noyau. En effet, dans moins de cinq ans, les ordinateurs de technologie Bull de la DAM devraient atteindre, voire dépasser, quelques centaines de petaflops, comme la machine Summit récemment présentée par l'industrie des États-Unis. Un nouveau seuil dans la précision et le réalisme des simulations sera ainsi franchi. ■

Retrouvez l'ouvrage des 60 ans de la DAM
<http://www-dam.cea.fr/dam/#PubliScience>