



Les
2



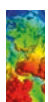
ans

du programme
Simulation :
histoire d'un succès !

Les
20
ans
du programme
Simulation :
histoire d'un succès !



N° ISBN : 978-2-7466-9244-2



Editorial

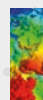
La Direction des applications militaires du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (la DAM) a en charge de conduire les programmes de Défense du CEA. Cela concerne principalement les armes nucléaires, les chaufferies nucléaires des sous-marins et du porte-avions Charles de Gaulle et la lutte contre la prolifération. Après l'arrêt définitif des essais nucléaires en 1996, la garantie des armes nucléaires en sûreté et performances s'appuie sur le programme Simulation. La DAM met au point les codes de calcul reproduisant la complexité du fonctionnement des armes par une modélisation physique très poussée, développe en co-design avec Atos/Bull les supercalculateurs permettant de mettre en œuvre les codes, et valide ces résultats numériques sur de grandes installations expérimentales de physique.

Comme vous pourrez le constater à la lecture de cette brochure, tous les attendus du programme Simulation lancé en 1996 ont été atteints. L'installation de radiographie Airix a été mise en service fin 1999. Epure (qui ne faisait pas partie du programme Simulation initial) lui a succédé en 2014. Le laser Mégajoule (LMJ) est en service depuis 2014. Avec Epure et le LMJ, des expériences de très grande qualité ont été réalisées, et l'on pressent tout leur potentiel pour l'avenir. De TERA 1 à TERA 100, trois générations de calculateurs ont servi à la garantie des armes ; la première partie de TERA 1000 est déjà opérationnelle. Ainsi, la nouvelle génération de concepteurs peut disposer de ces outils exceptionnels.

Au-delà des charges nucléaires, la méthodologie de garantie par la simulation a été étendue à toutes les fonctions des têtes nucléaires et irrigue maintenant l'ensemble des activités de la DAM. Ces travaux, au profit de la dissuasion nucléaire française, ont également permis de développer une industrie nationale de supercalculateurs et d'être un catalyseur dans le domaine de l'optique et des lasers.

Le défi du passage à la simulation a été relevé avec succès. Il s'est concrétisé par le renouvellement des têtes nucléaires des deux composantes.

François Geleznikoff
Directeur des applications militaires du CEA
(Juillet 2016)

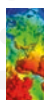




du programme
Simulation :
histoire d'un succès !

SOMMAIRE

Préambule	5
L'époque des pionniers	5
De la bombe atomique à l'arme thermonucléaire, développement de l'arsenal nucléaire	6
La politique française de désarmement et l'ultime campagne	8
La garantie par la Simulation, construction du programme	11
- Physique des armes et standards de garantie	11
- Simulation numérique et supercalculateurs	18
- Validation expérimentale	20
- L'installation Epure	20
- Le Laser Mégajoule	24
Chronologie du programme Simulation	28-29
Au-delà de la garantie des armes, la certification des équipes de physiciens	30
Les «retombées» du programme Simulation : ouverture scientifique et impact industriel	31
- L'ouverture côté laser	31
- L'ouverture côté calcul	31
Les résultats du programme Simulation : garantie de la TNO et de la TNA et au-delà	36
Encadrés	
- La démarche scientifique	37
- Atteindre l'exaflops à horizon 2020	40
- Epure-Teutatès	41
- Filière optique et lasers en Aquitaine	45



Préambule

En janvier 1996, le Président Jacques Chirac annonce l'arrêt définitif des essais nucléaires : la Direction des applications militaires du Commissariat à l'énergie atomique entre dans l'ère de la Simulation. Comment la DAM a-t-elle réussi le passage de l'essai nucléaire en vraie grandeur à la Simulation ? Pour le comprendre il faut revenir quelques années en arrière.



L'époque des pionniers

Les fondements du programme de Défense nucléaire français ont une double origine. Les scientifiques français sont parmi les premiers avec Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie, et Frédéric Joliot-Curie, à percer les secrets de l'atome et à percevoir l'intérêt stratégique de leurs découvertes. Puis, de la volonté farouche d'indépendance et de grandeur de la France du général de Gaulle naît, en 1945, le Commissariat à l'énergie atomique. Le CEA est chargé de poursuivre des recherches

scientifiques et techniques « en vue de l'utilisation de l'énergie atomique dans les divers domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale ». La DAM, créée en 1958, concrétise le programme qui lui avait été confié avec le premier essai nucléaire, Gerboise Bleue, réalisé en aérien dans le Sahara en 1960. Ce succès s'appuie déjà sur des compétences en détonique, en physique nucléaire, en neutronique, en métallurgie du plutonium et en expérimentation, mais aussi en mathématiques avec des calculs complexes réalisés sur les premiers ordinateurs Bull.



De la bombe atomique à l'arme thermonucléaire, développement de l'arsenal nucléaire

Le fil conducteur des expérimentations était le perfectionnement de la force de dissuasion, afin de doter la France de systèmes d'armes suffisants et crédibles. Les progrès se poursuivent et, après 8 ans d'effort, la première arme thermonucléaire est expérimentée avec succès en 1968, avec l'essai Canopus. Le déploiement des systèmes d'armes successifs depuis 1960 repose sur les essais nucléaires, qui

permettent à la DAM de certifier la fiabilité du fonctionnement des armes nucléaires et leur sûreté. Les évolutions des têtes nucléaires de la force de dissuasion française, à mesure que l'on passait successivement des armes à fission aux armes à fission exaltée, puis aux armes thermonucléaires, étaient à l'époque garanties par les essais nucléaires.



Calculateur sur le centre de calcul DAM de Limeil au début des années 1970.





Conteneur renfermant
la formule expérimentée
et les moyens de mesure,
utilisé lors des essais souterrains
à Mururoa.



Ce développement rapide n'a été possible que parce qu'il a été accompagné par un accroissement des capacités de simulation, notamment les moyens d'expérimentation détonique (pour caractériser le fonctionnement des explosifs utilisés et leur interaction avec les matériaux des armes), les modèles théoriques de comportement de la matière, les logiciels (ou « codes de calcul ») et les moyens informatiques de calcul (c'est-à-dire les ordinateurs).

Un autre axe, qui a joué un rôle majeur dans l'amélioration de l'efficacité des systèmes d'armes, a été l'implémentation dans les essais nucléaires de moyens de mesure procurant des informations de plus en plus précises. A la mesure de la puissance de la formule testée,

se sont rajoutés progressivement des dispositifs de mesure capables de sonder son fonctionnement intime. Ces moyens ont permis d'améliorer la modélisation physique de l'arme nucléaire et, en retour, de l'optimiser plus efficacement.

Au fil des progrès des moyens de mesure, les physiciens et les mathématiciens de la DAM développaient des outils de simulation numérique de plus en plus complexes pour prévoir les signaux à mesurer lors des essais nucléaires. Un cercle vertueux, alliant simulation et expérimentation, se mettait progressivement en place, pour aboutir à une optimisation très poussée des systèmes d'armes.

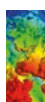
La politique française de désarmement et l'ultime campagne

Pour le Président François Mitterrand, le désarmement n'est rendu possible que si l'adversaire potentiel s'engage aussi à désarmer. A cet égard, la fin de la Guerre froide marque une évolution très nette. Dès lors, le Chef de l'Etat peut mettre en œuvre l'idée selon laquelle c'est en tant que puissance nucléaire que la France peut peser de manière efficace dans le domaine du désarmement. D'où la politique menée jusque-là consistant à créer un fait accompli, afin d'« avoir quelque chose à négocier ». La France réduit alors de manière significative le nombre de ses têtes nucléaires et promeut le concept de « suffisance », qui est aujourd'hui (en 2016) l'un des fondements de la doctrine nucléaire française. En ayant ratifié le TNP (Traité de Non-Prolifération) en 1992, la France agit désormais concomitamment contre la prolifération des armes nucléaires et en faveur du désarmement.

Après l'annonce soviétique, en octobre 1991, d'un moratoire sur les essais nucléaires, le Président François Mitterrand décide, de même, le moratoire en 1992. Dès 1991, la DAM avait initié un nouveau programme, PALEN (Préparation A une Limitation des Essais Nucléaires), dont l'objectif était de regrouper l'ensemble des actions mises en place (dont certaines depuis un certain temps) pour faire face à une potentielle forte réduction des essais nucléaires, que le contexte international laissait prévoir. L'entrée en vigueur inopinée du moratoire français, puis la perspective d'un traité international d'interdiction des essais nucléaires, ont conduit à une refonte du programme initial.

Avec PALEN, les lignes directrices du programme Simulation étaient définies, selon quatre axes :

- l'invention des « formules robustes »,



« Il s'agit maintenant de développer et d'obtenir une simulation complète qui permettra la mise au point des armes dont nous aurons besoin à l'horizon 2010, sans nouveaux essais nucléaires. ... C'est difficile ? Alors, il faut chercher. C'est votre métier de chercher et vous en avez la compétence. Nous disposons d'assez de chercheurs, d'assez d'ingénieurs, d'assez d'imagination et d'assez de courage. »

F. Mitterrand, 5 mai 1994, s'adressant à la sphère politique, industrielle et militaire de la Défense, réunie dans la salle des fêtes de l'Élysée.



c'est-à-dire des charges nucléaires peu sensibles à des variations technologiques et à des paramètres dont la représentation physique (ou « modélisation ») était jugée insuffisante à l'époque ;

- la physique des armes, destinée à bâtir les équations mathématiques modélisant les phénomènes physiques intervenant lors du fonctionnement des armes nucléaires ;
- la simulation numérique proprement dite, qui regroupe le développement des codes de calcul, qui résoudront les équations mathématiques, et l'acquisition des calculateurs nécessaires ;
- la validation expérimentale, permettant de réaliser des expériences spécifiques en laboratoire destinées à valider la modélisation développée. On parle de validation « par partie » car aucune de ces expériences ne peut valider en une fois la totalité des équations représentant le fonctionnement des armes. *A contrario*, les résultats des anciens essais nucléaires sont les seules données expérimentales permettant de valider en une fois la totalité de ce domaine : ils sont, à ce titre, irremplaçables.



Portrait officiel de
François Mitterrand
Président de la
République française
(1981-1995)



Avant l'arrêt définitif des essais, le Directeur des applications militaires, Roger Baleras, obtient de pouvoir valider sur des essais nucléaires ce nouveau principe de charge robuste, ainsi que des expériences de physique fortement instrumentées. C'est le Président Jacques Chirac qui décide de mener une ultime campagne d'essais nucléaires en 1995-1996, mais l'engagement de la fin définitive des essais nucléaires est pris. Cet arrêt est suivi par le démantèlement du Centre d'Expérimentation du Pacifique (CEP), que la France est la seule puissance dotée à avoir réalisé. En parallèle, le Président décide de fermer et démanteler les installations de production de matières fissiles destinées aux armes nucléaires et d'abandonner la composante sol-sol du plateau d'Albion. En 1996, la France signe le Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE) qu'elle ratifiera en 1998.

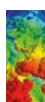
Comme le démontrent les déclarations des Présidents, la volonté de maintenir une dissuasion nucléaire crédible s'affirme plus que jamais. Cette dissuasion doit maintenant se fonder autrement : la capacité de pérennisation et d'adaptation des armes nucléaires est désormais adossée au programme Simulation.



Portrait officiel de
Jacques Chirac
Président de la
République française
(1995-2007)

« Nous disposons maintenant de tous les éléments pour relever le grand défi technologique de la simulation. Nous nous en donnerons les moyens. Je sais pouvoir compter sur le dynamisme et la compétence de nos ingénieurs et techniciens pour y parvenir. »

J. Chirac, 23 février 1996



La garantie par la Simulation, construction du programme

Le lancement du programme Simulation est décidé en 1995. Ce programme a pour objectif de pérenniser la dissuasion française après l'arrêt définitif des essais nucléaires. Il a été bâti pour permettre le renouvellement et la garantie sur le long terme des armes qui équipent les deux composantes de la dissuasion nucléaire française. Il a également comme objectif de permettre de former les experts dans le domaine extrêmement « pointu » et spécifique du fonctionnement des armes nucléaires.

Le programme Simulation n'est autre que la démarche scientifique appliquée aux armes (*voir l'encadré « Démarche scientifique » page 37*). Il s'articule autour des trois volets évoqués précédemment :

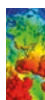
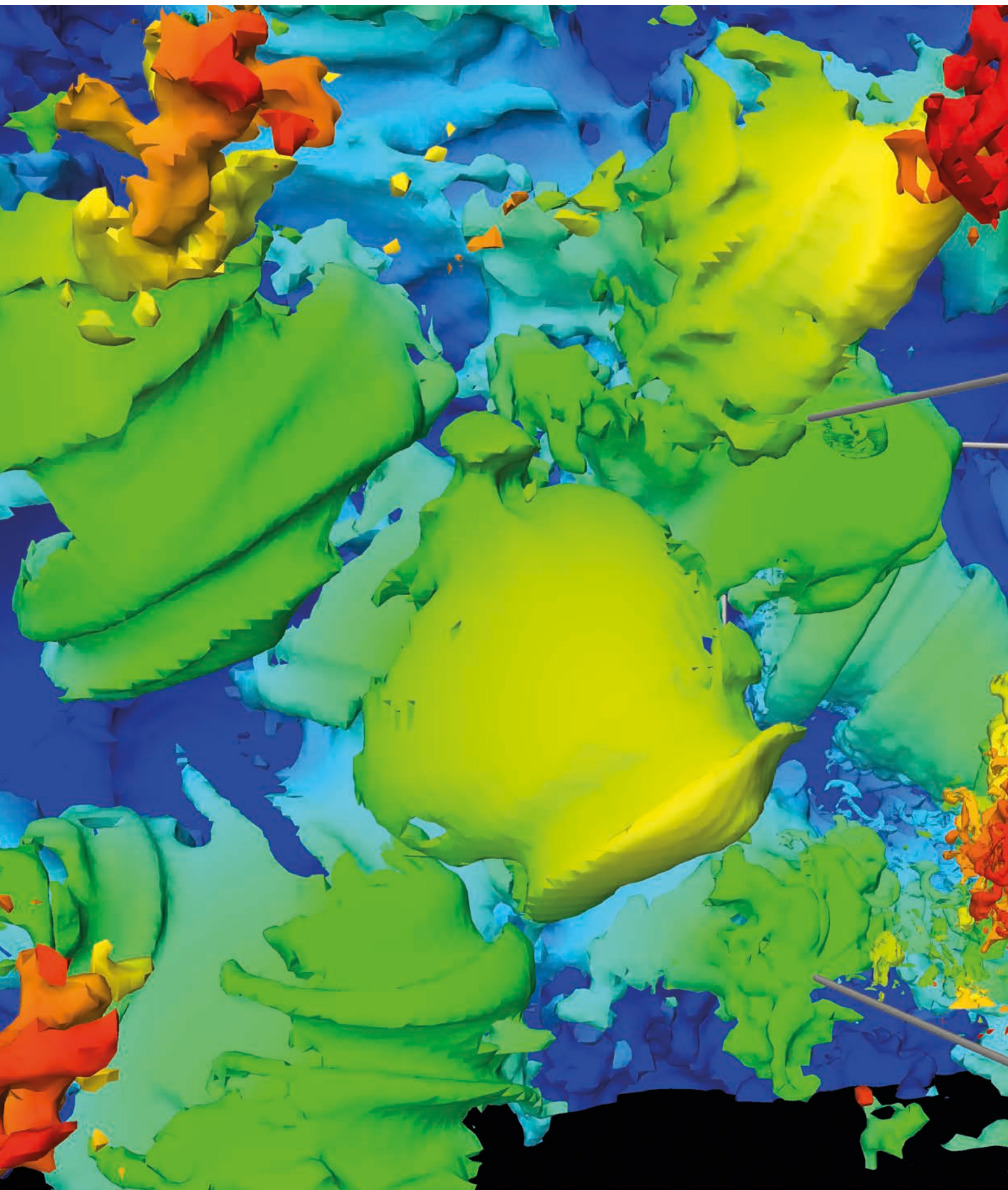
- la physique des armes, définissant la modélisation de tous les phénomènes physiques intervenant dans leur fonctionnement ;
- la simulation numérique de leur fonctionnement ;
- la validation expérimentale.

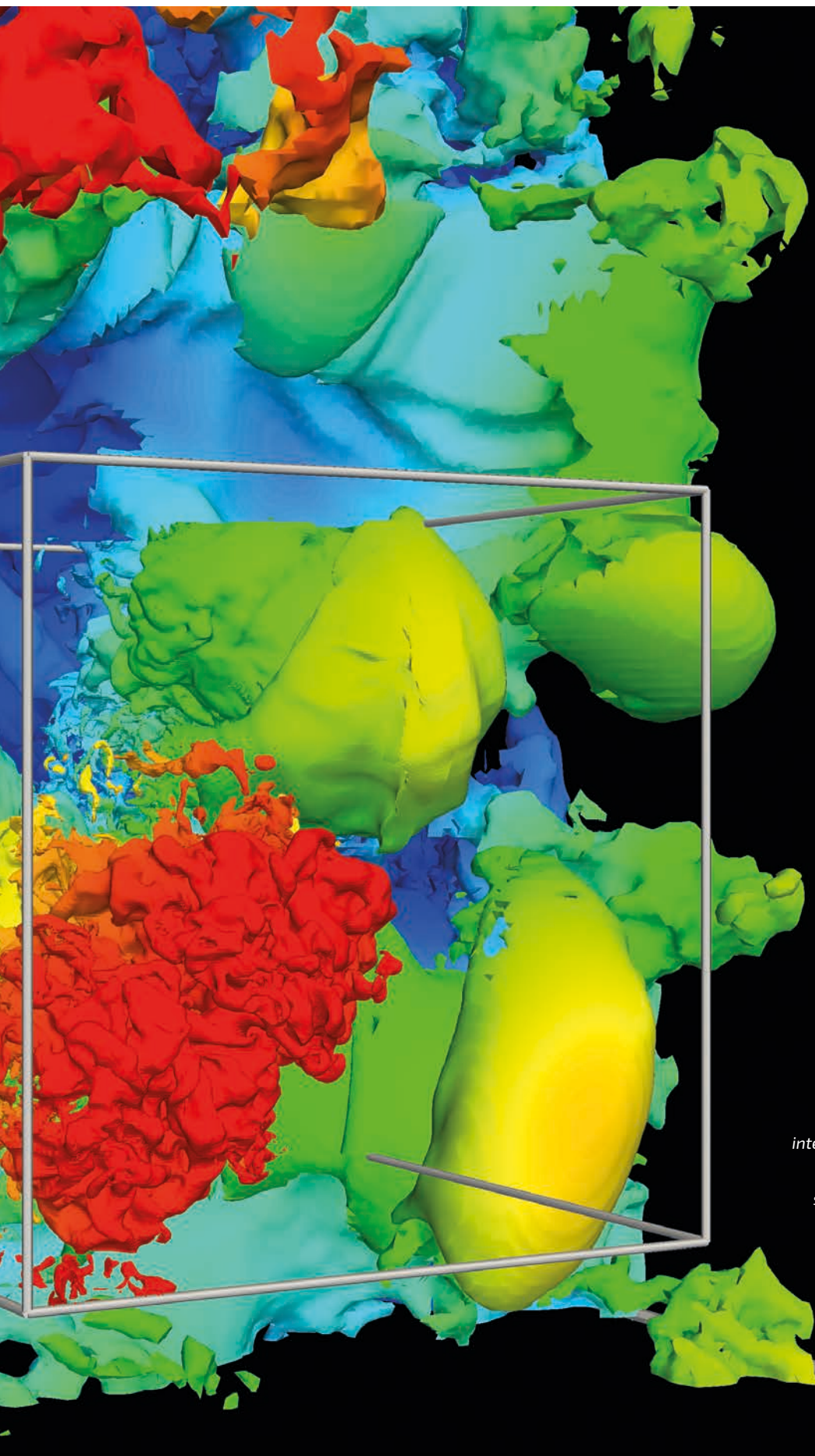
Physique des armes et standards de garantie

Le premier volet consiste à élaborer et sélectionner les modèles physiques destinés à reproduire par le calcul les trois phases de fonctionnement d'une arme nucléaire : pyrotechnique, fission et fusion. Ces modèles sont enchaînés de façon à obtenir un système d'équations mathématiques reproduisant le plus fidèlement possible le fonctionnement d'une arme nucléaire. La mécanique des fluides, le calcul des flux de neutrons (la neutronique) mais aussi l'évolution de la matière et des photons sont des éléments importants. Il faut ensuite résoudre le système d'équations sur un modèle de l'arme aussi proche que possible de la réalité, afin de décrire son évolution temporelle et de déterminer ses performances. Le caractère exceptionnel de la simulation des armes tient à la dynamique extrêmement rapide et au couplage intime des différents mécanismes et équations décrivant leur fonctionnement. La matière est portée dans des états extrêmes, avec des pressions de plusieurs milliards de fois la pression atmosphérique et des températures pouvant atteindre le milliard de degrés. La puissance de l'ordinateur disponible à un instant donné (rapidité des opérations et taille mémoire) est la principale limitation à la complexité et/ou à la taille du système d'équations que l'on pourra résoudre et, donc, à la précision de la simulation numérique du fonctionnement de l'arme nucléaire.

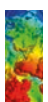
Toute la physique nécessaire à la garantie des armes nucléaires est capitalisée dans une chaîne de logiciels qui, avec leurs données d'entrée et leurs prescriptions







Simulation 3D
d'instabilités hydrodynamiques
intervenant dans le fonctionnement
des armes nucléaires
– zoom au sein du calcul
sur une structure tourbillonnaire.

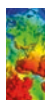


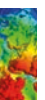
d'emploi, constituent le «standard de garantie» des armes.

Les données d'entrées, comme les lois de comportement des matériaux en fonction de la pression, la température et la vitesse de déformation, doivent être les plus précises possibles. Les modèles phénoménologiques, classiquement ajustés sur des expériences, vont être remplacés par des lois, calculées à partir de codes de physique microscopique, décrivant la matière à son échelle la plus intime, et validés par des expériences élémentaires. Ces expériences de physique sont menées sur de grands instruments de physique de la communauté académique nationale ou internationale comme les synchrotrons (*European Synchrotron Radiation Facility*, ESRF, à Grenoble et *SOLEIL* à Saint-Aubin) ou les accélérateurs de particules (*Grand Accélérateur National d'Ions Lourds*, GANIL, à Caen et *Los Alamos Neutron Science Center*, LANSCE, à Los Alamos, USA).

Trois générations de « standards » de plus en plus précis se sont ainsi succédé, de 1996 à 2016. Ces standards ont permis de concevoir, définir et garantir la Tête nucléaire aéroportée (TNA) et la Tête nucléaire océanique (TNO).

*Composante aéroportée
de la dissuasion nucléaire :
avion Rafale et missile ASMPA
emportant une
« maquette de tête nucléaire
aéroportée (TNA) ».*







Composante océanique de la dissuasion nucléaire : sous-marin nucléaire lanceur d'engins de nouvelle génération « Le Triomphant » et missile M51 emportant une « maquette de tête nucléaire océanique (TNO) ».





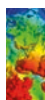
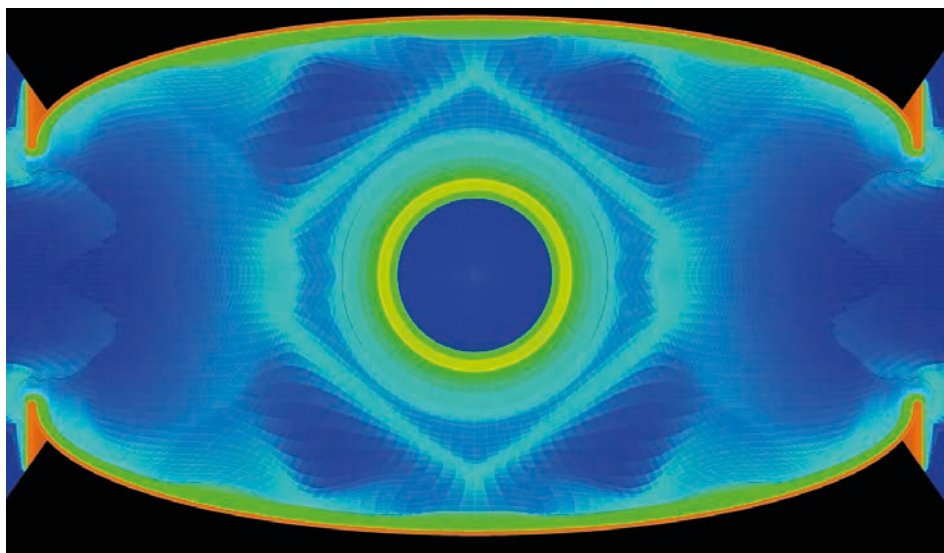
Simulation numérique et supercalculateurs

Le système d'équations modélisant le fonctionnement des armes est résolu sur un supercalculateur en le transformant par l'analyse numérique en un système d'équations « approchées ». C'est le deuxième volet du programme Simulation : la simulation numérique.

Le « modèle » de l'arme construit à l'aide du volet « modélisation physique » est découpé en de très nombreuses petites zones, appelées mailles. Sur chaque maille, les numériciens vont remplacer le système d'équations trop complexe à résoudre de façon exacte par un autre système, approché mais soluble par les ordinateurs. Il faut alors s'assurer que l'ordinateur fournit une représentation du fonctionnement de l'arme nucléaire aussi proche que possible de la réalité : on s'en approche d'autant plus que les mailles sont petites, et donc nombreuses, ainsi que l'ont montré les mathématiciens (notion de « convergence » de l'approximation numérique).



Simulation d'une expérience d'« ignition » sur le Laser Mégajoule : phase de compression d'une capsule contenant un mélange fusible de deutérium-tritium au sein d'une cavité en or éclairée par les 176 faisceaux du LMJ. L'espace est découpé en petits éléments constituant un « maillage », visible sur cette image, qui permet la résolution spatiale des modèles physiques pris en compte dans la simulation.





 Supercalculateur TERA 100, développé par Bull (devenu Atos/Bull) en collaboration avec le CEA/DAM, installé sur le centre DAM/Ile-de-France en 2010 : premier calculateur européen à franchir la barre du petaflops soutenu (1 million de milliards d'opérations par seconde).

Simuler le fonctionnement d'une arme nucléaire implique des dizaines, voire des centaines de millions de mailles. Les systèmes d'équations associés ont alors des milliards d'inconnues. Cela nécessite de disposer d'ordinateurs très puissants pour conserver une durée de calcul acceptable.

Trois générations de supercalculateurs ont été définies et réalisées pour mettre en œuvre les standards de garantie :

- TERA 1, en 2001, avec 5 teraflops,

soit 5000 milliards d'opérations par seconde,

- TERA 10, en 2005, avec 50 teraflops,
- TERA 100, en 2010, avec 1,3 petaflops, soit plus d'un million de milliards d'opérations par seconde.

Cela a nécessité une perpétuelle adaptation des codes à ces générations de machines, ainsi que de l'ensemble des logiciels d'environnement des codes (préparation des données, exploitation, visualisation...). Forte de son expérience,



TERA 1**TERA 100**

Evolution de la précision de simulation 2D d'un phénomène d'instabilités hydrodynamiques en fonction de la puissance des calculateurs TERA 1 à TERA 100 pour une même durée de calcul. La finesse de description des structures tourbillonnaires accessible par la simulation s'approche progressivement de la réalité physique.

et compte-tenu de ses besoins très spécifiques et particulièrement exigeants en terme de puissance de calcul, la DAM, dans un souci d'efficacité et de souveraineté, a co-développé les machines TERA 10 et TERA 100 avec le constructeur français Bull.

Avec l'arrivée de l'ordinateur TERA 100 en 2010 sur le centre de DAM Ile-de-France, la puissance de calcul du programme Simulation a été multipliée par 20000 depuis 1996. Ce besoin d'augmentation de la puissance des calculateurs est déterminé par le besoin d'amélioration de précision de la simulation numérique, lui-même adapté au besoin de la garantie de fonctionnement et de sûreté des armes nucléaires. Pour la phase suivante du programme Simulation, il conviendra de disposer à l'horizon 2020 d'une machine de classe exaflopique, en levant des défis technologiques par étapes, dont la première vient d'être franchie avec l'installation de la première tranche du supercalculateur TERA 1000 (voir l'encadré page 40 « Atteindre l'exaflops à horizon 2020 »).

Validation expérimentale

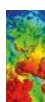
Modèle par modèle, des expériences spécifiques de validation sont réalisées. Pour valider plus globalement l'enchaînement des modèles physiques du standard de garantie, deux grandes installations, AIRIX (Accélérateur à Induction de Radiographie pour l'Imagerie X) et le LMJ (Laser Mégajoule), ont été définies.

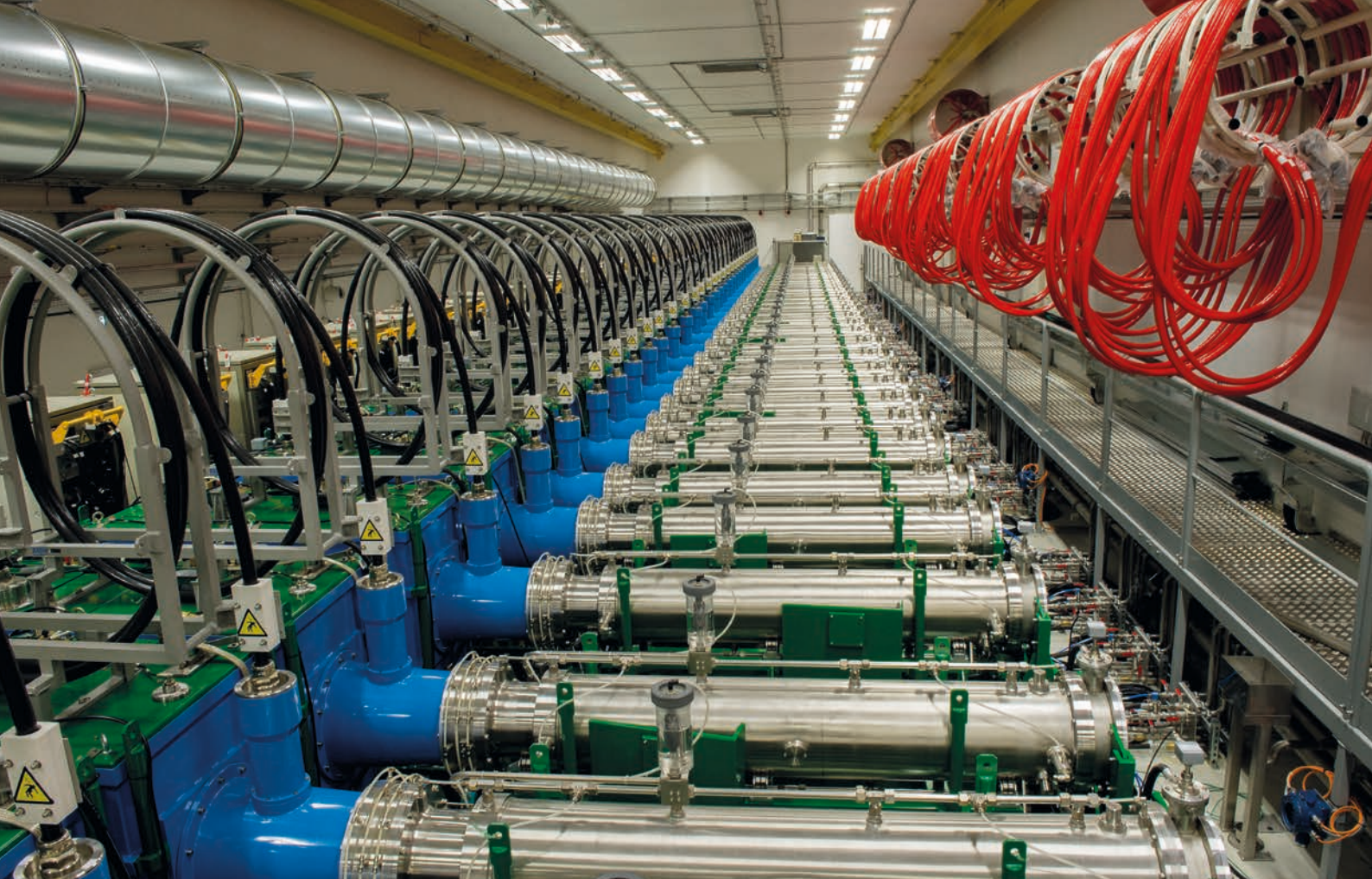
La première est une installation de « radiographie », dédiée à la phase non nucléaire du fonctionnement de l'arme ; la seconde est un « laser de puissance », pour reproduire à toute petite échelle les conditions physiques dans lesquelles se trouve la matière lors du fonctionnement nucléaire de l'arme.

L'installation Epure

Dans l'installation AIRIX, mise en service fin 1999, ont été réalisées toutes les expériences nécessaires aux programmes TNA et TNO, ainsi que la qualification des outils numériques du programme Simulation. Elle donne accès, en utilisant la radiographie X éclair, aux mouvements de la matière lors de la phase hydrodynamique du fonctionnement de l'arme, phase qui précède le déclenchement des réactions de fission.

Cette installation a été arrêtée en 2012. La machine de radiographie a été transférée dans l'installation Epure. L'installation Epure est opérationnelle depuis septembre 2014, avec un axe de radiographie, conformément à ce que l'on escomptait pour la phase 1 d'Epure. Cette installation a permis, dès 2015, d'obtenir des résultats expérimentaux de grande précision concernant l'état et le comportement des matériaux des armes, dont le plutonium, dans les conditions rencontrées avant le fonctionnement nucléaire de l'arme.





 Générateur de radiographie X éclair (machine AIRIX) au sein de l'installation Epure.

La construction d'Epure se poursuit depuis 2010 dans le cadre du traité franco-britannique Teutates (voir l'encadré « projet Epure-Teutates page 41 »). L'installation

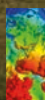
complète en 2022 permettra d'obtenir, grâce à deux axes de radiographie supplémentaires, plusieurs « clichés » sous divers angles et/ou à différents instants.

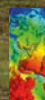


 Installation franco-britannique Epure sur le centre DAM de Valduc.



 Installation Laser Mégajoule
sur le centre DAM du Cesta.





Le Laser Mégajoule

L'installation la plus emblématique du programme Simulation est le Laser Mégajoule, qui est l'outil indispensable de validation expérimentale des phénomènes physiques intervenant dans la phase de fonctionnement nucléaire des armes.

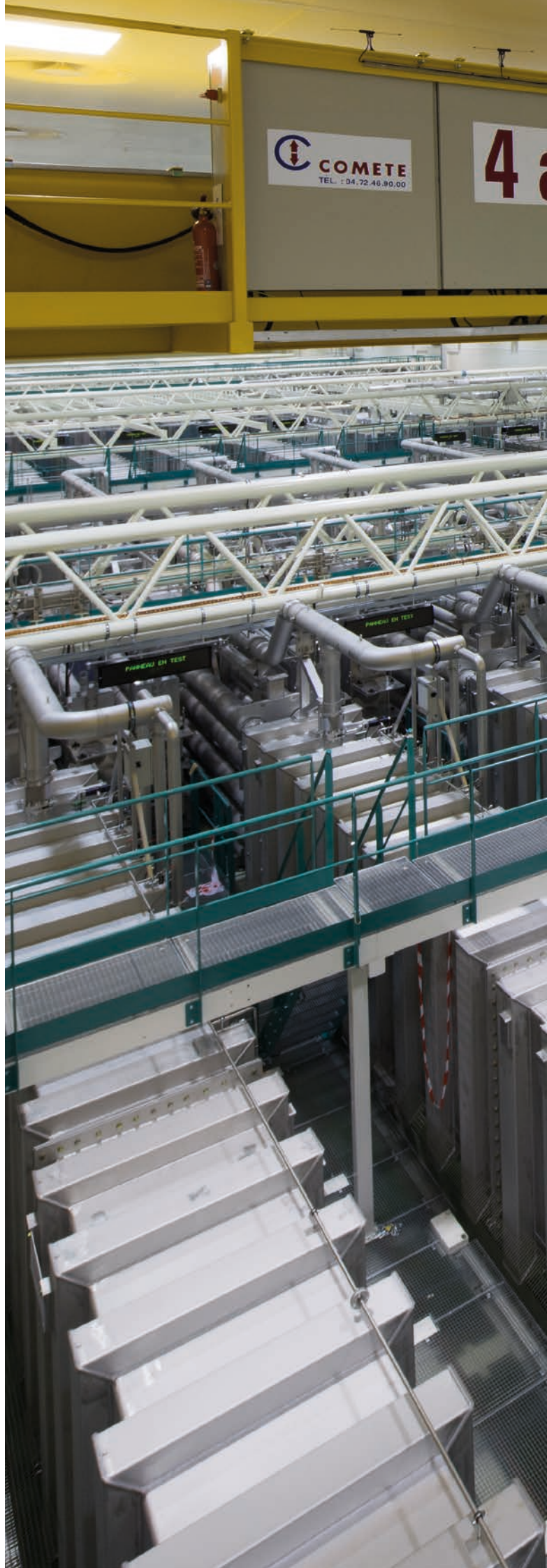
La France a été le premier pays à percevoir, dès les années 60, l'intérêt des lasers pour porter la matière dans des états de haute densité d'énergie (forte pression et forte température) et a développé un savoir-faire dans le domaine des lasers de puissance. Fort de cette expérience nationale, la réalisation du Laser Mégajoule (LMJ) a été décidée. L'objectif du LMJ, dans le respect du TICE, est de réaliser des expériences et de produire des mesures sur de la matière, dans les conditions physiques similaires à celles du fonctionnement nucléaire de l'arme.

Le LMJ est dimensionné pour produire, après conversion dans le domaine ultraviolet de ses 176 faisceaux, une énergie lumineuse de 7,5 kJ par faisceau, soit plus de 1,3 MJ au total. Cette énergie est focalisée, avec une précision de pointage de 50 microns, sur une cible de dimension millimétrique, après un trajet optique total de plus de 1 km.

Le LMJ permet d'obtenir, sur des géométries expérimentales de taille millimétrique, des phénomènes de même nature que ceux intervenant dans les armes et de les mesurer avec les précisions requises. Son utilisation permet en particulier :

- de valider les modèles fondamentaux (équations de physique) décrivant la physique du fonctionnement des armes nucléaires ;

*Un des quatre halls laser
du Laser Mégajoule.*







 *Chambre d'expériences du Laser Mégajoule.*

- de réaliser des expériences de physique mettant en jeu l'enchaînement et l'imbrication de ces modèles.

Ces expériences sont essentielles pour qualifier la « couverture » la plus complète possible du domaine de fonctionnement des armes par les logiciels de simulation numérique. La validation de la simulation repose sur de très nombreuses catégories d'expériences. Les expériences les plus complexes sont celles conduisant à la combustion thermonucléaire d'un mélange deutérium-tritium dans une micro-cible.

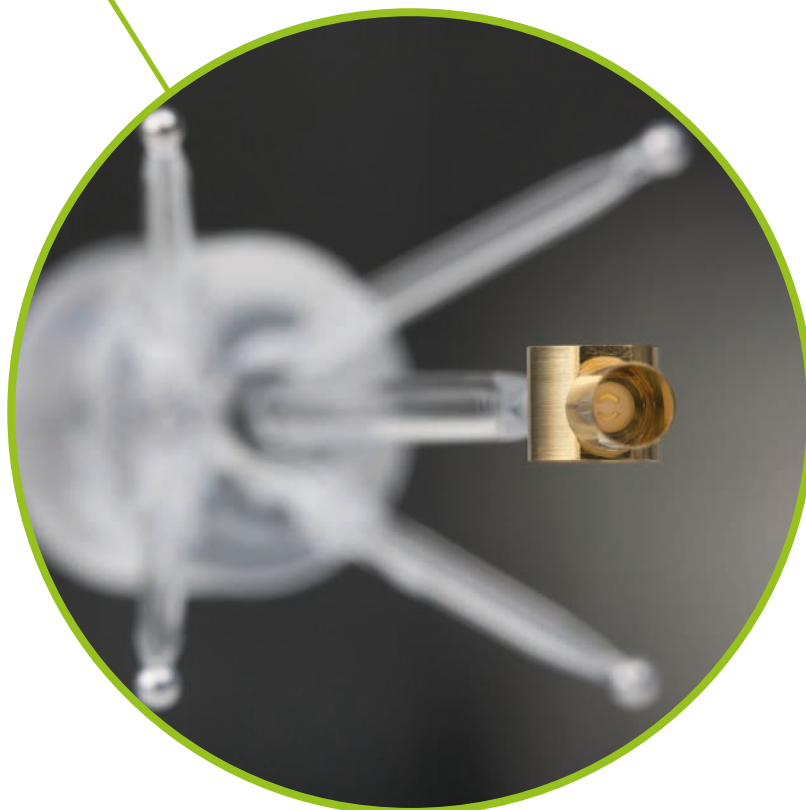
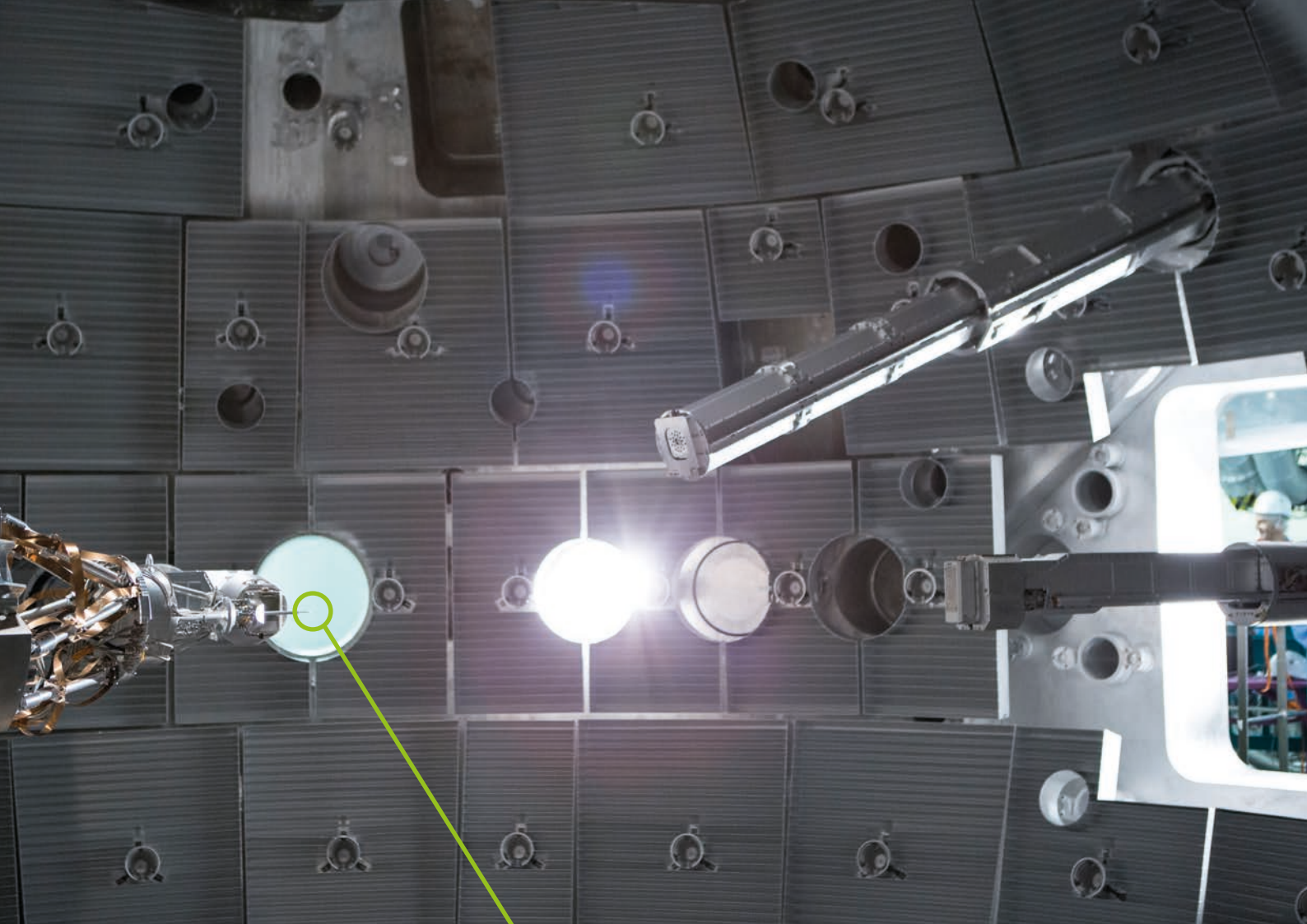
La seule machine équivalente dans le monde est le NIF, *National Ignition Facility* américain à Livermore (Californie). Les deux installations ont d'ailleurs donné lieu à des collaborations, sur les composants optiques par exemple.

La LIL (Ligne d'Intégration Laser), prototype à 4 faisceaux du LMJ a été opérationnelle de 2003 à début 2014. Elle a permis, d'une part, de qualifier la technologie du LMJ et, d'autre part, de réaliser une quarantaine de campagnes d'expériences dédiées en

grande partie à la physique des armes et notamment à la préparation des expériences LMJ.

La mise en service du LMJ, matérialisée par la réalisation des premières expériences, est effective depuis le 23 octobre 2014. L'objectif de cette première campagne de physique des armes sur le LMJ était de caractériser la dynamique de l'évolution d'un matériau soumis à du rayonnement. Grâce à la remarquable stabilité des performances laser du LMJ, il est ainsi possible de réaliser des études paramétriques portant sur la nature du matériau de la cible, l'énergie laser mise en jeu et les caractéristiques de l'impulsion laser, afin de caractériser finement certains phénomènes physiques.

La montée en puissance progressive du LMJ et du système expérimental associé (une quarantaine de dispositifs de mesure de quatre types différents) permettra d'accéder à des expériences de plus en plus représentatives et précises, qui permettront de valider les futurs standards de garantie des armes.



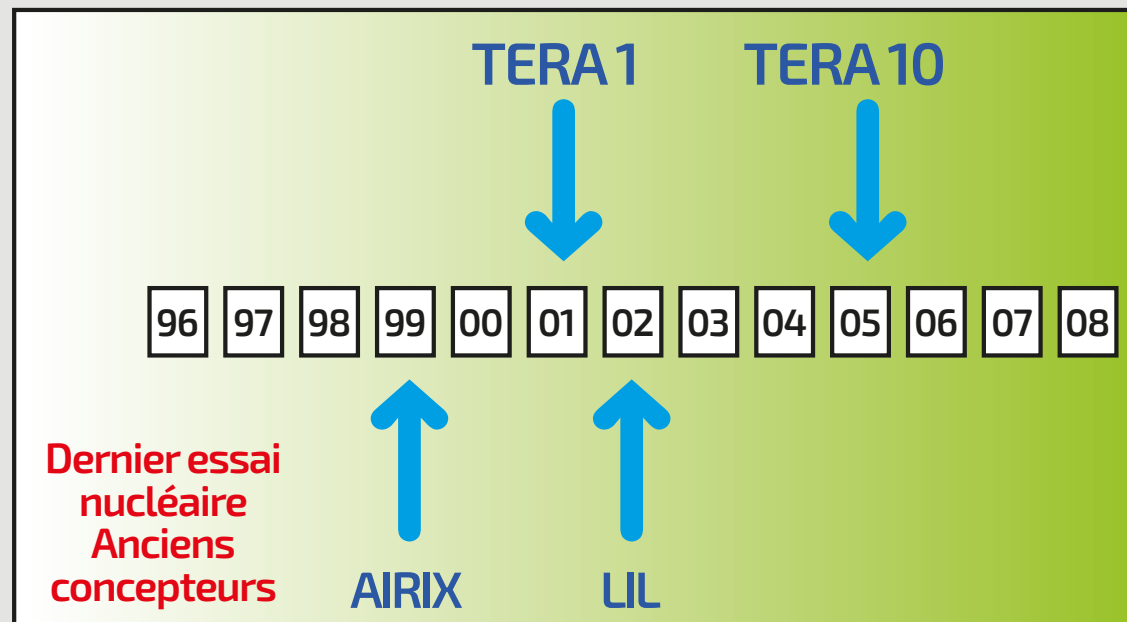
*Cible de taille millimétrique
utilisée, au sein
de la chambre d'expérience
du Laser Mégajoule
pour la première expérience
de physique des armes
sur le LMJ.*



Physique
des armes

AMELIORATION DES

Simulation
numérique

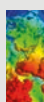


Validation
expérimentale

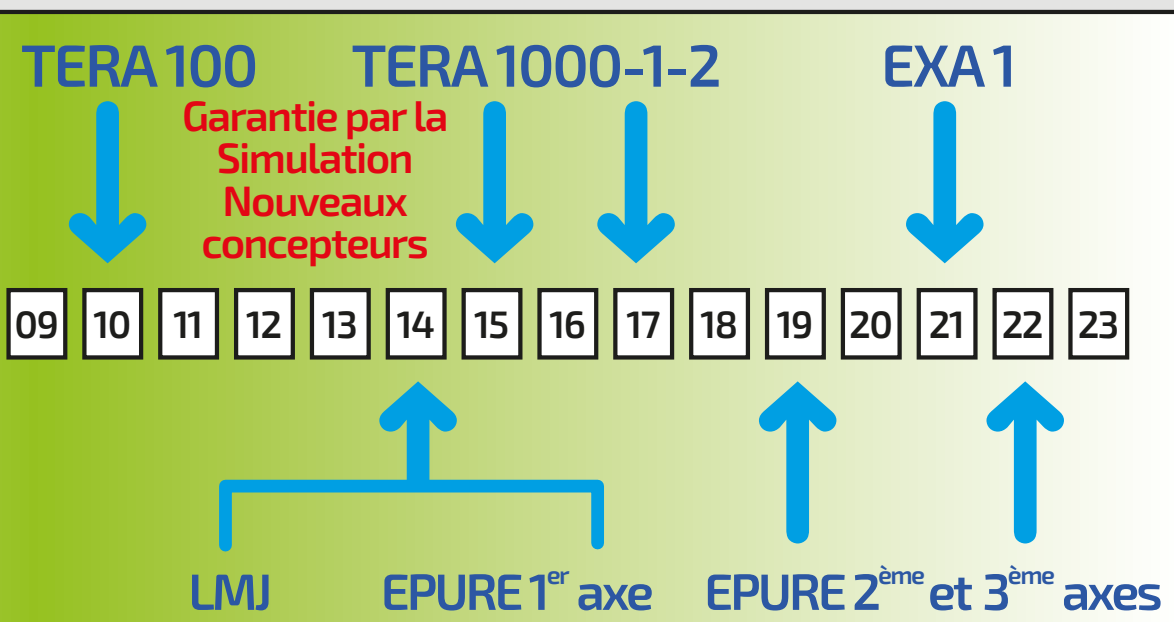


Frise chronologique
du programme Simulation

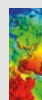
Phase de construction
(1996 - 2014)



STANDARDS DE GARANTIE



**Phase d'extension
et d'exploitation**



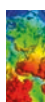
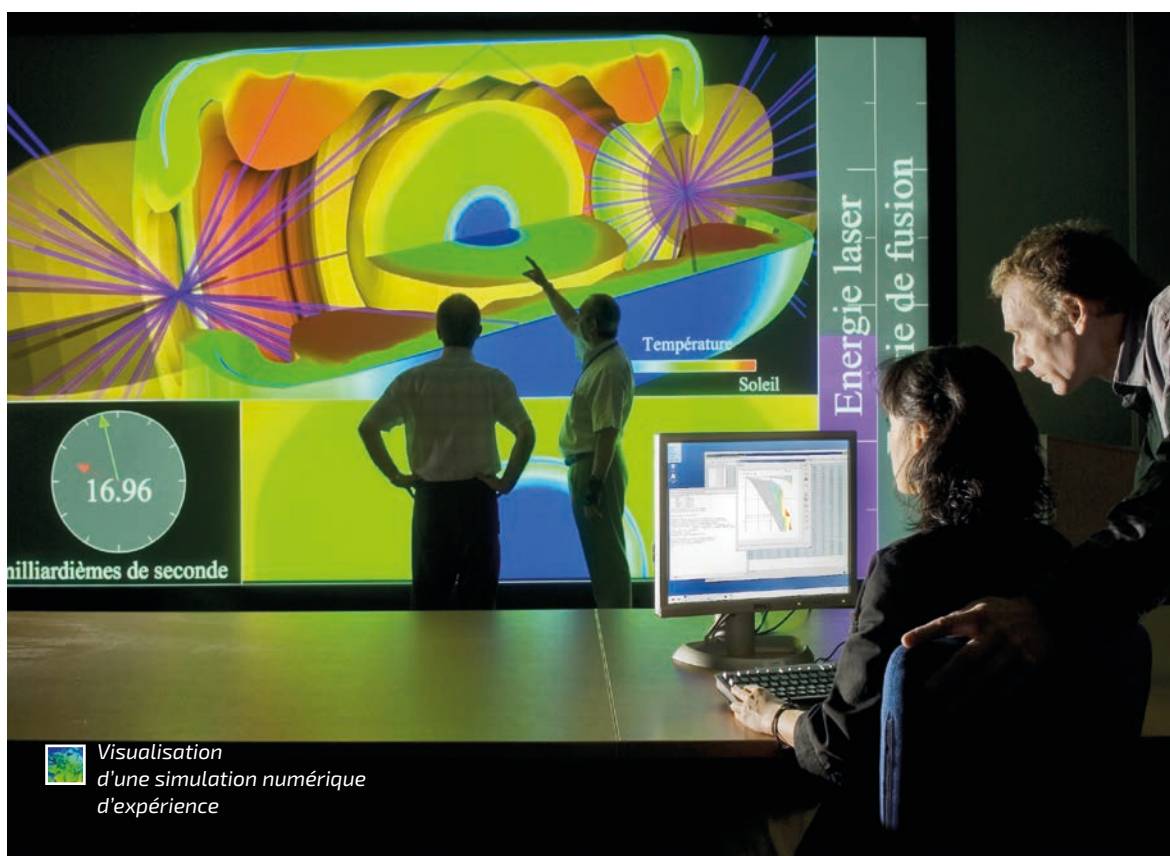
Au-delà de la garantie des armes, la certification des équipes de physiciens

C'est un point rarement évoqué, mais la principale difficulté à laquelle est confronté un pays privé d'essais nucléaires est la formation et la certification des experts – car, *in fine*, c'est sur eux que repose la confiance que l'on accorde à la dissuasion. Le principal apport des essais était, en effet, leur caractère à la fois « formateur » (par la confrontation qu'ils permettent entre les calculs de prévision et les mesures réalisées lors des expériences) et « certificateur » : le concepteur qui avait la lourde charge de garantir l'arme – et donc *in fine* la dissuasion – avait, auparavant, dû réussir plusieurs essais et, donc, avoir démontré sa maîtrise du fonctionnement avec l'aide de l'outil numérique.

A l'ère de la Simulation, la garantie sera apportée grâce aux standards de garantie utilisés par des experts compétents. Ce

n'est pas dans l'obtention d'un résultat par simulation numérique que réside la difficulté, mais dans la capacité à employer avec discernement les différents modèles, grandeurs physiques et équations, mis en œuvre pour obtenir le résultat. Ce sont des ingénieurs chevronnés, dotés d'une expertise incontournable, qui forment des « apprentis » pour l'acquisition de cette capacité.

L'acquisition de cette compétence passe par la confrontation des apprentis à des expériences de laboratoire similaires, pour chacune d'entre elles, à une phase de fonctionnement des armes. Le LMJ et Epure, sont les grands instruments qui permettent de réaliser les expériences de formation par la pratique, puis de qualification des jeunes apprentis concepteurs d'armes.



Les «retombées» du programme Simulation : ouverture scientifique et impact industriel

L'ouverture des grands moyens de la DAM, approuvée en 2002 par le Ministre de la Défense, facilite la confrontation et l'évaluation scientifiques extérieures et permet le partage national des compétences.

L'ouverture côté laser

Dès 2003, le CEA, le CNRS, l'Université de Bordeaux et l'Ecole Polytechnique ont créé l'Institut Lasers et Plasmas (ILP) pour fédérer les compétences scientifiques nationales autour du LMJ et des lasers des laboratoires universitaires français. L'ILP organise l'accès de la communauté académique au LMJ (autour de 25 % du temps disponible). Dix campagnes d'expériences dites « ouvertes » ont déjà été conduites à partir de 2005 sur le prototype LIL dans les domaines de l'astrophysique, la planétologie ou la production d'énergie par FCI (Fusion par Confinement Inertiel). Les premières expériences sur le LMJ auront lieu en 2017.

Très vite, la communauté académique a exprimé le grand intérêt de disposer aussi d'une ligne laser « picoseconde » c'est-à-dire à impulsions mille fois plus brèves que celles du LMJ. Cela a conduit au lancement officiel en 2005 du projet PETawatt Aquitaine Laser (PETAL), laser 7 PW couplé au LMJ. PETAL bénéficie des financements du Conseil Régional d'Aquitaine, du Ministère de la Recherche et de l'Union Européenne. Le Conseil Régional en assure la maîtrise d'ouvrage et le CEA/DAM la maîtrise d'œuvre. PETAL a déjà atteint une puissance de 1,2 PW en 2015, ce qui en fait le laser mono-faisceau de grande énergie le plus puissant au monde. L'installation LMJ-PETAL est unique et place la France dans une position de premier plan pour aborder des secteurs inexplorés de la physique des Hautes Densités d'Energie (HDE).

Le Laser Mégajoule est une installation expérimentale hors du commun par sa taille et sa très grande complexité, mais c'est surtout un extraordinaire succès de l'industrie française puisque près de 1 000 entreprises des secteurs du bâtiment, de la Défense et de la mécanique, ainsi que de très nombreuses PME de haute technologie, y ont participé. Le Laser Mégajoule, du fait de ses exigences de performances largement au-dessus des standards industriels communs, est et restera une formidable référence de classe mondiale pour les industriels qui en ont été acteurs. Le projet LMJ a également contribué à structurer une filière optique et laser nationale du meilleur niveau (voir l'encadré « Filière Optique et Lasers »).

L'ouverture côté calcul

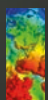
Le CEA est totalement impliqué dans la stratégie nationale et européenne du Calcul Haute Performance (HPC). Pour garantir une offre industrielle compétitive, pérenne et souveraine dans le domaine du HPC, la DAM s'est employée à bâtir depuis plus de 10 ans un écosystème industriel et académique reposant sur 3 piliers :

1. les technologies matérielles et logicielles, qui incluent la R&D et la conception de machines ;
2. les grandes infrastructures, qui comprennent les machines et les centres de calcul ;
3. les applications, qui englobent les projets de simulation, les développements applicatifs et les formations nécessaires pour utiliser ces machines.





Section amplificatrice
du faisceau laser PETAL
dans le hall laser sud-est
de l'installation
Laser Mégajoule.





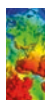
Concrètement la DAM a initié en 2005, avec un petit groupe d'industriels, le technopôle européen de compétences en simulation numérique haute performance Ter@tec, chargé de promouvoir l'ensemble de la chaîne de valeur du HPC, afin de positionner la France parmi les principaux acteurs mondiaux du domaine. L'association Ter@tec, qui comprend plus de 80 membres académiques et industriels, est aussi un campus situé à proximité du centre DAM/Ile-de-France, accueillant des entreprises et des laboratoires mixtes industrie-recherche.

Aujourd'hui, le complexe de calcul scientifique du centre DAM Ile-de-France comprend, outre la machine TERA d'Atos/Bull, réservée aux besoins de la Défense, deux grandes infrastructures au sein du Très Grand Centre de Calcul du CEA (TGCC). La première, de visibilité européenne, est destinée aux besoins de la recherche académique. Il s'agit de la machine Curie d'Atos/Bull, de classe petaflopique, dont 80% sont accessibles aux organismes de recherche européens pour le programme PRACE (*Partnership for Advanced Computing in Europe*) et 20% aux laboratoires de recherche français, via la société civile GENCI (Grand Equipement National pour le Calcul Intensif). La seconde est destinée aux besoins de l'industrie. Elle s'appuie sur le Centre de Calcul Recherche et Technologie (CCRT) du CEA qui héberge la machine Airain d'Atos/Bull, de classe petaflopique. Le CCRT est utilisé par des industriels partenaires et les laboratoires du CEA.

Le technopôle Ter@tec et le CCRT fédèrent une expertise applicative de haut niveau, à travers des projets industriels dans des domaines variés (énergie, automobile, aéronautique, moteur, matériaux, cosmétique, santé...).



Entrée du Très Grand Centre de Calcul (TGCC) sur le site du centre DAM/Ile-de-France.





Les résultats du programme Simulation : garantie de la TNO et de la TNA et au-delà

Le programme Simulation, tel que lancé en 1996, a été parfaitement réalisé en termes de délais, performances et coûts. L'investissement public associé au programme Simulation représente de l'ordre de sept milliards d'euros sur 20 ans. Il a permis la conception et la garantie des têtes nucléaires de renouvellement des composantes aéroportée (TNA) et océanique (TNO). Citons, à ce propos, le Président de la République François Hollande, qui s'est exprimé en ces termes lors de son discours sur la dissuasion nucléaire, prononcé à Istres en 2015 :



que doit remplir une tête nucléaire (furtivité, rentrée atmosphérique,...). Cette démarche est désormais appliquée aux autres programmes de la DAM comme la propulsion nucléaire et la défense conventionnelle.

L'utilisation de la Simulation procure à la DAM un gain en temps important dans la conduite de ses programmes ainsi qu'une réduction de ses coûts comme cela est constaté dans d'autres domaines de l'industrie (aéronautique, automobile...).

« Je voudrais donc saluer l'extraordinaire défi scientifique et technique que représente ce programme de simulation. La Direction des applications militaires du CEA respecte toutes les échéances de ce projet, tout en maîtrisant la dépense. »

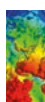
F. Hollande, 19 février 2015.

Outre le travail accompli par les équipes du CEA, les équipements du programme Simulation ont été réalisés grâce à des prouesses technologiques presque exclusivement par l'industrie française (70% du budget y ont été réinjectés). Le programme Simulation est désormais entré dans une phase d'exploitation et d'extension au profit des programmes futurs. Il assurera la pérennité de la dissuasion sur le long terme et permettra de garantir à la Défense, la fiabilité et la sûreté des armes nucléaires, en tenant compte des inévitables évolutions liées au vieillissement des systèmes et aux mutations des technologies de fabrication.

Avec le temps, la démarche des standards de garantie de fonctionnement nucléaire de l'arme s'est étendue à toutes les fonctions

Enfin, le programme Simulation montre la capacité de la DAM à relever de véritables défis scientifiques, technologiques et industriels, ce qui contribue à la crédibilité de la dissuasion française. Il maintient l'attractivité pour les scientifiques et les ingénieurs et, au-delà, participe à accroître le potentiel d'innovation de l'industrie française.

De même qu'elle fut pionnière dans l'arrêt des essais nucléaires et le démantèlement des usines de production de matières fissiles destinées aux armes nucléaires, la France s'investit activement dans la non-prolifération des armes nucléaires dans le monde avec l'appui scientifique et technique de la DAM.



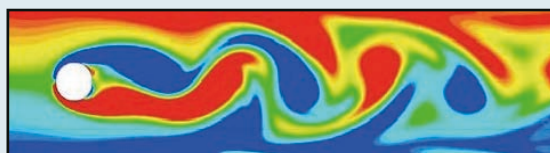
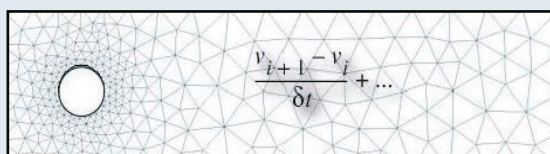
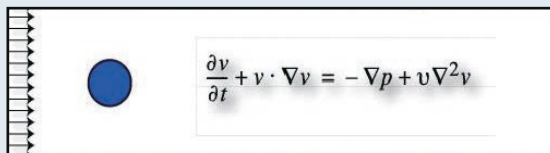
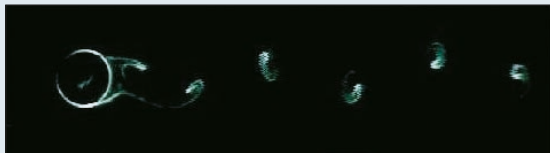
La démarche scientifique

La démarche scientifique est une démarche itérative :

- de modélisation physique de phénomènes réels, représentés par des équations mathématiques,
- de simulation numérique de ces équations, résolues pas à pas, dans l'espace et le temps, grâce à de puissants ordinateurs,
- et de validation expérimentale des résultats de ces calculs, par confrontation

avec les résultats de mesures relevées lors d'expériences mettant en jeu ces phénomènes.

L'enjeu est de réduire les écarts entre simulation et expérience en corrigeant les modèles physiques jusqu'à ce qu'ils soient valides dans un domaine d'utilisation, c'est-à-dire suffisamment représentatifs de la réalité dans ce domaine pour pouvoir remplacer l'expérience dans les études que l'on doit mener.



1. Réalité : les physiciens tentent de représenter des phénomènes physiques complexes réels, par des lois sensées régir leur comportement.

2. Modélisation : il s'agit de la traduction des lois de comportement physique par des équations mathématiques, souvent complexes.

3. Résolution numérique : la complexité des équations nécessite que celles-ci soient résolues de manière non pas continue mais « discrète » c'est-à-dire seulement en des points de l'espace et du temps, grâce à la puissance d'un ordinateur.

4. Simulation : la résolution des équations dans le temps et l'espace est visualisée sur un écran où l'on observe l'évolution de quantités physiques caractérisant le phénomène simulé.

5. Expérimentation : lorsqu'il est possible de reproduire ces phénomènes réels en laboratoire, on peut comparer les mesures des quantités d'intérêt avec leurs valeurs calculées. Cette comparaison renseigne sur la validité des modèles.

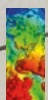


Etude de l'écoulement d'un fluide autour d'un cylindre : étapes d'une démarche scientifique.





Supercalculateur
TERA 1000-1,
en service sur le centre
DAM / Ile-de-France.





Atteindre l'exaflops à horizon 2020

La puissance des supercalculateurs est dimensionnée par la DAM pour répondre aux besoins des programmes qui lui sont confiés. Les enjeux du programme Simulation à l'horizon 2020 nécessiteront la mise en œuvre d'un supercalculateur de classe exaflopique à cette date. Des ruptures technologiques sont nécessaires pour y parvenir, notamment pour maîtriser la consommation électrique d'une telle machine, réguler les flux et gérer le volume considérable des données produites par des simulations de plus en plus précises de phénomènes multi-physiques et multidimensionnels.

Pour atteindre l'échelle exaflopique à l'horizon 2020, le CEA a décidé de poursuivre la méthodologie de co-design avec Atos/Bull, qui a fait ses preuves et qui repose sur une optimisation des performances du couple code de simulation – supercalculateur.



Une telle augmentation de puissance implique de nombreuses évolutions technologiques et logicielles. Afin de réaliser cette transition en toute sécurité, la DAM a décidé d'installer par étapes un supercalculateur pré-exaflopique, TERA 1000. Une première tranche TERA 1000-1, de technologie en continuité par rapport à TERA 100, permet déjà de diviser par 5 la consommation énergétique (par rapport à TERA 100), tout en multipliant par 2 la puissance. Une deuxième tranche, TERA 1000-2, permettra d'atteindre 25 Pflops en 2017, soit une puissance 20 fois supérieure à TERA 100 pour une même consommation énergétique.

L'accroissement de puissance de calcul s'obtient grâce à l'augmentation de la puissance de calcul unitaire de chaque cœur et par un plus grand nombre de cœurs sur chaque processeur. Le nouveau processeur de la famille Intel® Xeon, nom de code Knights Landing (KNL), intégré dans le module initial de TERA 1000-2, opère ainsi 72 cœurs à comparer aux 16 cœurs des processeurs Nehalem installés sur TERA 100. Le réseau d'interconnexion assurant les communications est complètement repensé. Les codes de calcul doivent pouvoir exploiter les différents niveaux de parallélisation offerts par la nouvelle conception de la machine. L'ensemble de ces actions est structuré par un programme de R&D avec Atos/Bull, financé en partie dans le cadre du Plan d'Investissement d'Avenir « calcul intensif ».



Supercalculateur
TERA 1000-1



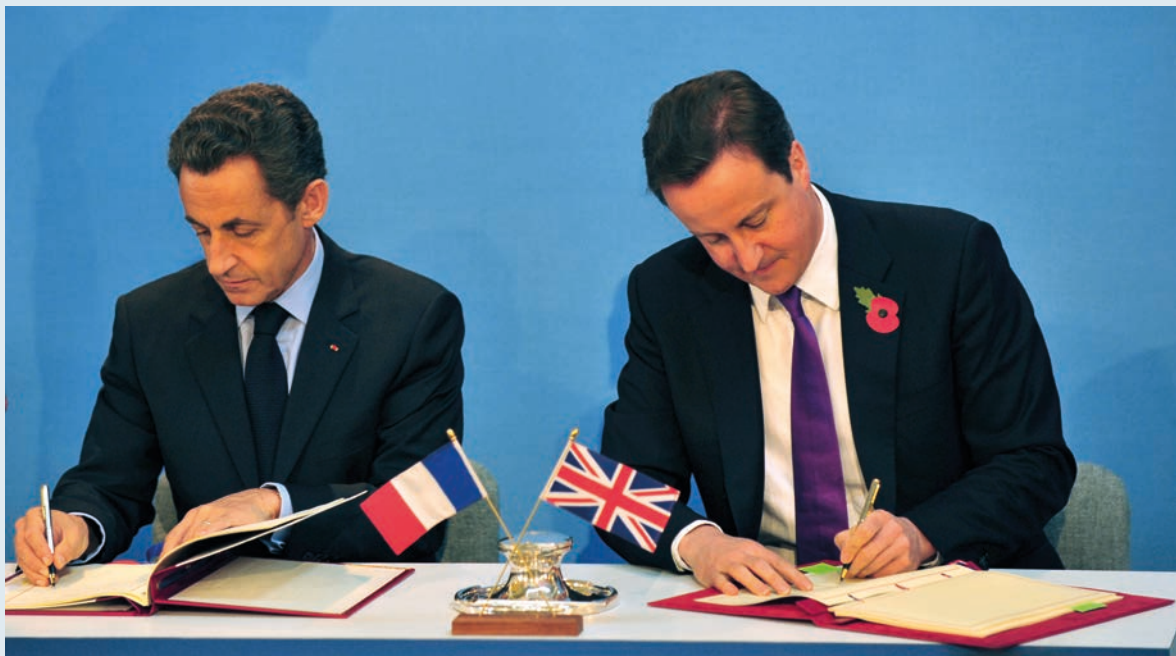
Epure-Teutatès

Dans le cadre du traité de Défense franco-britannique signé à Londres le 2 novembre 2010, le Président de la République française et le Premier Ministre britannique ont signé un traité spécifique (traité Teutatès), relatif au partage d'installations radiographiques dédiées à leurs programmes de dissuasion respectifs.

Les installations dont les deux pays se dotent se doivent d'être compatibles des

graphique en France, Epure, sur le centre CEA de Valduc ;

- la réalisation en commun de développements technologiques (machines radiographiques, instruments de mesures...), au sein du *Technology Development Center* (TDC), sur le centre de l'*Atomic Weapons Establishment* (AWE), à Aldermaston (Royaume-Uni).



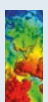
engagements internationaux des deux pays vis-à-vis du Traité d'interdiction complète des essais (TICE) et du Traité de non-prolifération (TNP). Ces installations sont destinées à leur permettre de continuer à garantir, désormais sans réaliser d'essai nucléaire, la fiabilité et la sûreté de leurs armes. Après une analyse conjointe, il est apparu que les besoins techniques et calendaires des deux pays étaient très similaires et qu'un programme unique (baptisé Teutatès) pouvait satisfaire le besoin des deux pays. Ce programme se traduit par :

- la construction et l'exploitation commune d'une installation radio-



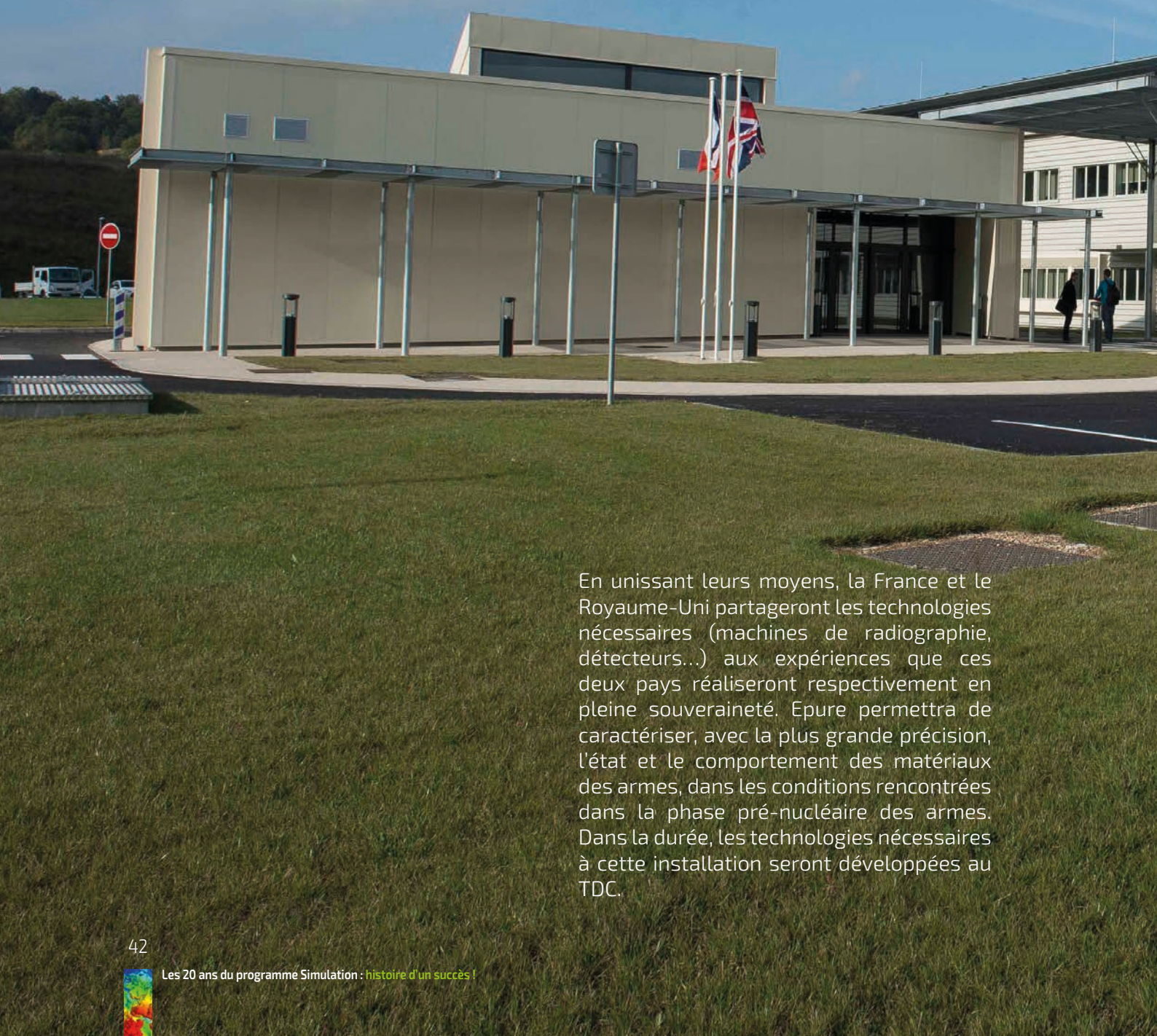
Signature du Traité de Défense franco-britannique à Londres le 2 novembre 2010.

L'installation de physique expérimentale Epure, mise en service opérationnel en octobre 2014, permet de mettre en œuvre des essais et des expériences de laboratoire indispensables à la garantie du fonctionnement des armes nucléaires et à leur sûreté. Ces expériences sont réalisées sans aucun dégagement d'énergie nucléaire, conformément aux engagements internationaux souscrits par la France et le Royaume-Uni.

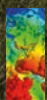




Entrée de l'installation
franco-britannique Epure sur
le centre DAM de Valduc.



En unissant leurs moyens, la France et le Royaume-Uni partageront les technologies nécessaires (machines de radiographie, détecteurs...) aux expériences que ces deux pays réaliseront respectivement en pleine souveraineté. Epure permettra de caractériser, avec la plus grande précision, l'état et le comportement des matériaux des armes, dans les conditions rencontrées dans la phase pré-nucléaire des armes. Dans la durée, les technologies nécessaires à cette installation seront développées au TDC.



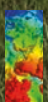


Ce programme constitue une importante source d'économies. Les deux pays ont décidé de partager, à parts égales, les coûts correspondants de construction, d'exploitation pendant plusieurs dizaines d'années, et de démantèlement. Il n'y a pas de partage sur les expériences réalisées.

Cela permet aussi aux scientifiques et experts des deux pays de partager leur expérience en matière de technologies de mesure et de mise en œuvre des expériences. Le climat de confiance créé

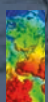
entre les équipes est propice au débat scientifique et à l'émulation. Il permettra de préserver, sur le long terme, la qualité et la motivation des scientifiques qui ont la charge de la garantie des armes sans essais nucléaires.

En contribuant au maintien de la crédibilité de la dissuasion de deux nations, cette coopération témoigne de la confiance qui existe entre les deux pays.



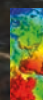


Institut Optique d'Aquitaine.



Filière optique et lasers en Aquitaine

La réalisation du LMJ sous maîtrise d'œuvre du CEA s'appuie sur des industriels en charge de développer, fabriquer, assembler puis maintenir les différents sous-ensembles pendant au moins 30 ans. Cela conduit à développer, grâce à l'impulsion dynamique de la Région Aquitaine, une industrie nationale de haute technologie, baptisée « filière optique », pour laquelle la proximité immédiate du LMJ est bénéfique.



La labellisation du « Pôle de Compétitivité Route des Lasers » en 2005 a renforcé en Aquitaine la dynamique née autour de la construction du LMJ, en favorisant le développement industriel de la filière bien au-delà de la sous-traitance du LMJ. Ce pôle, qui regroupe fin 2015 plus de 160 adhérents, a conduit à la création de 28 sociétés et à 30 nouvelles implantations.

Labellisé en 2007, le « Centre de Ressources Technologiques ALPhANOV » constitue un acteur majeur pour le transfert technologique dans le Pôle. ALPhANOV permet aux industriels (PME, grands groupes) et aux laboratoires de recherche de travailler ensemble. Les premières années de fonctionnement de ce centre ont validé le concept : le mélange de cultures ingénieurs-chercheurs s'est traduit par la mise sur le marché de produits industriels. Le succès d'ALPhANOV, en croissance, a considérablement augmenté l'attractivité du territoire aquitain.

L'« Institut Optique d'Aquitaine », construit par le Conseil Régional d'Aquitaine (ALPC), offre depuis 2014 une grande opportunité pour la filière, avec un lieu unique permettant de réunir un fort potentiel technologique : cet institut accueille la plateforme technologique ALPhANOV, une plateforme de formation professionnelle (PYLA), des industriels ainsi que les chercheurs et les étudiants de l'« Institut d'Optique Graduate School ».

Une « Société d'Economie Mixte Locale Route des Lasers » (SEML), à vocation patrimoniale, a également été constituée en 2004 en soutien au développement de la filière « optique et lasers ». Cette SEML a permis d'aménager deux parcs technologiques :

- la zone Laseris, située à proximité du LMJ, au Barp, afin d'accueillir les industriels primo-contractants du projet LMJ, mais aussi d'autres sociétés ;
- la Cité de la Photonique, située à Pessac, permettant de mettre des

infrastructures adaptées à disposition des industriels de la filière optique et laser non directement liés au programme LMJ.

Des sociétés fortement innovantes y sont implantées.



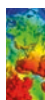
Les 20 ans du programme Simulation : histoire d'un succès !

Crédits photographiques

Couverture, pages 1 et 47 : V. Guyoton-Marine Nationale, R. Nicolas-Nelson-Armée de l'air, CEA-DAM, MS-CEA.
Intérieur : CEA-DAM pages 5, 6, 7, 12-13, 18, 19, 20, 21, 28-29, 30, 37, 38-39, 40, 42-43.
La Documentation française. Photo Gisele Freund page 9, La Documentation française. Photo Bettina Rheims page 10,
Présidence de la République-P. Segrette page 36
MS-CEA pages 22-23, 24-25, 26, 27, 28-29, 32-33, 44-45.
V. Guyoton-Marine Nationale page 16, A. Monot-Marine Nationale page 17, P. Stroppa-CEA pages 34-35, Crown page 41.



Une publication CEA DAM
Conception graphique et impression BSMÉDIA - 33710 Samonac.
Dépôt légal Août 2016
N° ISBN : 978-2-7466-9244-2





Direction des applications militaires

www-dam.cea.fr