

ASSOCIATION DES RETRAITÉS DU GROUPE CEA
Groupe Argumentaire sur les Energies Nucléaire et Alternatives

SIMULATION ET DISSUASION NUCLÉAIRE

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la politique de dissuasion nucléaire de la France, le CEA est chargé de la conception, de la fabrication, du maintien en condition opérationnelle et du démantèlement des têtes nucléaires.

Depuis l'arrêt définitif des essais nucléaires français, les têtes nucléaires, appelées à remplacer les armes en service arrivant en fin de vie, sont garanties sans essais nucléaires nouveaux. Le programme Simulation, lancé en 1996, répond à cet objectif de garantie de fiabilité et de sûreté des têtes nucléaires et assure la pérennité de la capacité de dissuasion de la France.

2. LA FIN DES ESSAIS NUCLÉAIRES

Depuis le 13 février 1960 jusqu'en 1992, la France a réalisé 204 expérimentations nucléaires : au Sahara jusqu'en 1962, puis sur les atolls de Mururoa et Fangataufa.

En 1995, le Président de la République, J. CHIRAC, a pris la décision d'arrêter définitivement les essais nucléaires français après une ultime campagne qui s'est déroulée de septembre 1995 à janvier 1996.

Il a également redéfini les moyens de la dissuasion nucléaire pour les adapter au contexte géopolitique international en respectant le principe de stricte suffisance, ce qui s'est traduit par :

- le maintien des seules composantes océanique et aéroportée
- l'arrêt de la production de matières fissiles (pour le plutonium, cette décision date de 1993), et le démantèlement des installations de productions associées
- la dernière campagne d'essais
- le lancement du programme Simulation
- la signature et la ratification du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE)
- le démantèlement du Centre d'Expérimentation du Pacifique

Jusqu'en 2009, le fonctionnement des armes était garanti par les essais. Dès octobre 2009, les TNA (Têtes Nucléaires Aéroportées) ont commencé à être mises en service en remplacement des TN81 et leur fonctionnement garanti, pour la première fois dans le monde, par simulation. Il en est de même pour la composante océanique avec le remplacement de la TN75 par la TNO (Tête Nucléaire Océanique) en 2016.

3. COMMENT GARANTIR LE FONCTIONNEMENT DES ARMES FUTURES SANS LES ESSAIS NUCLÉAIRES ?

Le fonctionnement et la sûreté des armes en service (TN75 et TN81) étaient garantis par les essais nucléaires qui ont conduit à les mettre au point.

Mais ces armes vieillissent du seul fait de l'évolution naturelle des matériaux nucléaires qui les composent. Leur durée de vie est donc limitée, et leur renouvellement est nécessaire pour assurer la continuité de la dissuasion. Les têtes nucléaires qui renouvellent progressivement les armes en service arrivées en fin de vie sont garanties sans nouveaux essais nucléaires.

Le programme Simulation a été lancé en 1996 pour répondre à cet objectif.

En l'absence d'expérimentations en vraie grandeur, la stratégie de renouvellement des armes a été bâtie en partant de l'absolue nécessité de se donner des moyens de garantir leur fonctionnement et leur sûreté.

Cette stratégie repose sur trois éléments :

- le concept de charges robustes, dont l'intérêt réside en un fonctionnement peu sensible aux variations technologiques et aux incertitudes des codes de calcul, il a été testé lors de l'ultime campagne d'essais nucléaires en 1995-1996
- la validation par la simulation des écarts imposés par la militarisation entre les formules expérimentées et les charges nucléaires de renouvellement
- la certification de nouvelles équipes chargées de garantir le bon fonctionnement des armes

Le programme Simulation repose d'une part sur des équipes scientifiques de haut niveau et d'autre part sur des grands équipements indispensables pour résoudre et valider les équations modélisant le fonctionnement des armes nucléaires : supercalculateurs, machines radiographiques, laser Mégajoule (LMJ)

L'outil de synthèse de ce programme est le « standard de garantie » constitué d'une chaîne de logiciels reproduisant par le calcul et la modélisation physique les différentes phases de fonctionnement d'une arme nucléaire. Sa mise en œuvre nécessite l'enchaînement de modèles physiques (équations) mis au point dans le cadre d'études scientifiques et technologiques ainsi que l'utilisation de puissants moyens de calcul pour résoudre ces équations.

Le supercalculateur TERA 100, installé sur le centre DAM Ile-de-France en remplacement de TERA 10 utilisé pour la garantie de la TNA, a été pleinement opérationnel au profit des concepteurs d'armes dès début 2011. Depuis cette date TERA 100 a été utilisé avec le standard de garantie 2010 pour tous les travaux de garantie du fonctionnement des armes.

Compte tenu de l'accroissement de puissance de calcul associée au besoin d'amélioration de la précision des standards de garantie, un nouveau calculateur, TERA 1000, a été installé à partir de 2015. Fruit d'un co-design réalisé avec le constructeur ATOS/Bull, TERA 1000 est constitué de deux partitions : TERA 1000-1, de technologie voisine de TERA 100, permet de gérer l'obsolescence de ce dernier et TERA1000-2, de conception plus innovante, préfigure l'arrivée en 2021 du calculateur EXA1, de classe exaflopique (un exaflops correspond à un milliard de milliard d'opérations par seconde). TERA 1000-1 a permis notamment de réaliser les travaux de validation du nouveau standard de garantie, homologué en 2017, qui intègre dans son périmètre de validation les résultats expérimentaux acquis auprès des installations EPURE et du LMJ.

Avec le calculateur TERA 1000, 2 installé en totalité fin 2017, la puissance de calcul a été multipliée par 20 à même consommation électrique totale, par rapport à TERA 100.

La démarche de garantie par la simulation du fonctionnement nucléaire mise en place et en œuvre par la DAM depuis 1996 a été étendue aux autres fonctions de la charge. Ainsi fin 2011 a été prononcée l'homologation des premiers standards de calcul 2010 pour les autres fonctions de la TNO que l'énergie. Le processus s'est poursuivi depuis avec une deuxième version de ces standards en 2017.

4. LES OUTILS DE LA SIMULATION

- **D'AIRIX** (Accélérateur à Induction de Radiographie pour l'Imagerie X) à **EPURE** (Expérimentation de Physique Utilisant la Radiographie Eclair)

AIRIX est une machine à rayons X, qui était installée à Moronvilliers (fin 1999) en Champagne, et qui a permis de valider les modèles relatifs à la phase dite hydrodynamique (non nucléaire) de mise en condition par explosif chimique (phénomènes pyrotechniques + hydrodynamiques).

Pour cela AIRIX génère des rayons X extrêmement pénétrants (50 000 fois l'énergie d'une radio pulmonaire) qui permettent d'obtenir des radiographies d'une grande finesse spatiale et temporelle de la matière en cours de compression.



La machine de radiographie AIRIX

Le site de Moronvilliers ayant été fermé, AIRIX a été déplacé sur le centre DAM de Valduc, il constitue le premier axe radiographique de l'installation Franco-Britannique du programme EPURE et a été remis en service en octobre 2014.

Les premières expériences réalisées en 2015 avec les matériaux constituant les armes ont porté la confirmation d'homologation de la TNO. EPURE apporte depuis des données expérimentales de grande qualité pour contraindre les modélisations physiques mises en jeu dans les standards de garantie. Cette installation sera dotée à terme de trois axes radiographiques de forte puissance et permettra de mesurer, avec la plus grande précision, l'état et le comportement des matériaux qui constituent les armes, dans des conditions de température et de pression extrêmes, durant la phase hydrodynamique (sans dégagement d'énergie nucléaire).

Il sera alors possible de réaliser lors d'une même expérience trois radiographies des matériaux aux instants choisis par les scientifiques en charge de la garantie du fonctionnement des armes. La réalisation de cette installation se fait dans le cadre du traité de Défense franco-britannique signé à Londres en novembre 2010 par le président de la République Française et le premier ministre Britannique.

La France et le Royaume-Uni ont décidé de partager deux installations de physique expérimentale ce qui s'est traduit par la construction et l'exploitation commune d'une installation radiographique et hydrodynamique en France EPURE et d'une installation pour des développements technologiques communs au sein du Technology Development Center au Royaume-Uni sur le centre de l'Atomic Weapons Establishment à Aldermaston.



Représentation de l'installation EPURE

- **LMJ** (Laser Mégajoule)

Le LMJ, dont la construction au CESTA est achevée, est indispensable pour simuler le fonctionnement nucléaire de l'arme.



Bâtiment LMJ

Il est dimensionné pour que l'énergie apportée par les faisceaux laser puisse conduire à la fusion de quelques milligrammes d'un mélange de deutérium-tritium.

Le LMJ permet d'atteindre en laboratoire des conditions thermodynamiques (densité, pression, température) extrêmes, similaires à celles rencontrées lors du fonctionnement nucléaire de l'arme.



Chambre d'expérience du LMJ

L'utilisation du LMJ permet en particulier :

- de valider les modèles fondamentaux (équations de physique) décrivant la physique du fonctionnement des armes nucléaires et de vérifier que la modélisation prend bien en compte la totalité des phénomènes mis en jeu
- de réaliser des expériences mettant en jeu l'enchaînement et l'imbrication de ces modèles. Ces expériences sont essentielles pour démontrer la maîtrise effective, par les physiciens, de la bonne « couverture » des standards du domaine de fonctionnement des armes
- d'atteindre la fusion par confinement inertiel (FCI)

Trois types d'expériences sont réalisables au LMJ :

- les expériences de mesures de données de base : indispensables, elles visent à acquérir des données qui valideront les modèles de matière (équations d'état sous choc, opacités spectrales, lois de comportement des solides)
- les expériences de validation par parties : chacune des expériences met en œuvre un seul des phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement de l'arme
- les expériences globales : elles mettent en œuvre plusieurs phénomènes interagissant entre eux, cela permet d'évaluer l'outil de simulation dans sa totalité

Le LMJ devait comporter jusqu'à 240 faisceaux laser, d'une puissance totale de 500 TERAwatts, concentrant 1,8 millions de joules en quelques milliardièmes de seconde sur une cible de taille millimétrique, pour produire la fusion deutérium-tritium.

Compte tenu de l'expérience acquise ces dernières années sur la LIL (Ligne d'Intégration Laser, prototype échelle 1 de 4 faisceaux du type LMJ), et d'une modélisation plus précise des phénomènes d'implosions dans les cibles laser (grâce au calculateur TERA), l'énergie nécessaire n'est plus que 1,5 millions de joules que l'on obtiendra avec **176 faisceaux laser**.

De plus, on garde la possibilité d'ajouter dans l'avenir des faisceaux supplémentaires qui pourraient servir à des expériences futures sur la fusion inertielle.

La mise en service fin 2014 d'une première chaîne laser (8 faisceaux) a permis de réaliser la première campagne expérimentale de physique des armes. La montée en puissance de l'installation se poursuit avec 2 chaînes mises en service fin 2016 et 5 chaînes montées fin 2017.

Plusieurs types de diagnostics (dispositifs de mesure) ont également été développés ce qui a permis de réaliser plus d'une centaine d'expériences de physique des armes dans différents domaines allant de l'hydrodynamique radiative à l'implosion de capsules sphériques.

• TERA

La série des super calculateurs TERA est au centre du programme de simulation : ils permettent de reproduire par le calcul les différentes étapes du fonctionnement d'une arme nucléaire.

La modélisation donne accès notamment au calcul des énergies mises en jeu, des déformations des matériaux, des phénomènes de turbulence, des rayonnements induits.

Améliorer la capacité de prédiction des modèles nécessite une description informatique encore plus fidèle de la géométrie et de l'environnement de l'arme. Tout ceci concourt à un besoin d'utilisation en routine de logiciels tridimensionnels qui vont demander beaucoup plus de temps et de puissance de calcul.

Le programme Simulation dans sa phase initiale avait prévu l'acquisition de 3 calculateurs :

- TERA, en 2001, constitué de 640 processeurs (Hewlett Packard, américains) de puissance totale 5 téraflops (1000 milliards d'opérations flottantes par seconde)
- TERA 10, acheté en 2005, constitué de 8000 processeurs de puissance totale 62 téraflops et fabriqué par BULL
- TERA 100, devenu opérationnel au premier trimestre 2011 ; a remplacé TERA 10 dont il occupe les bâtiments. Sa capacité de calcul de plus d'un pétaflops (million de milliards d'opérations par seconde) le situe comme l'un des plus puissants calculateurs d'Europe.
La validation informatique de TERA 100 a été obtenue fin 2010 avec le passage du cas test de référence mondial Linpack qui a enregistré une puissance réelle de 1,05 pétaflops

Depuis début 2012, la machine TERA 100 a été utilisée pour les travaux de garantie de la TNO ainsi que pour les travaux de mise au point des nouveaux modèles physiques requis pour les standards de garantie futurs.

Une augmentation importante de la puissance de calcul est nécessaire pour accompagner l'évolution des standards de garantie en réponse aux besoins de la Défense.

Le calculateur TERA 1000, de la génération suivante préfigure les prochaines architectures prévues pour la machine EXA1 en 2021.

La mise en service progressive de TERA 1000 a commencé en 2015 et s'est terminée fin 2017.

La partition TERA 1000 1, constituée de processeurs Xéon d'INTEL est en exploitation depuis 2016 avec une puissance de calcul de 2,5 pétaflops pour une consommation électrique de 1 MW.

La partition TERA 1000 2 destinée à lever les premiers verrous technologiques de l'exaflops, est constituée de processeurs Xéon Phi d'INTEL et développe une puissance de calcul de 25 pétaflops pour une consommation électrique de 4 MW. Cette partition a déjà permis de produire des résultats inaccessibles avec TERA 100 et également de commencer la nécessaire adaptation des codes de calcul à ce nouveau type d'architecture.



TERA 1000 1

TERA1000 2

5. LES OUTILS DU PROGRAMME SIMULATION AU SERVICE DE LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE ET DE L'INDUSTRIE

Le programme français de simulation, destiné à pérenniser la dissuasion nucléaire française, permet la mise à disposition de la communauté scientifique nationale et internationale d'outils uniques : les moyens numériques du TGCC (Très Grand Centre de Calcul) et le laser mégajoule LMJ pouvant autoriser des progrès considérables, en particulier dans la recherche. Leur développement nécessite de faire appel à tout un tissu industriel et favorise ainsi une dynamique économique.

Les moyens numériques du TGCC

Autour du centre DAM/Île de France est développé un pôle de compétence sur le calcul de hautes performances dans le cadre du campus **TERATEC** qui vise à associer la recherche, l'enseignement (CNRS, Universités, Écoles d'ingénieurs) et l'industrie (EDF, SAFRAN, THALES, L'OREAL...), le TGCC (Très Grand Centre de Calcul du CEA) qui a accueilli fin 2011 le super calculateur pétaflopique européen Curie de 2 pétaflops.

Il propose depuis :

- un accès privilégié au premier moyen de calcul en Europe
- des équipements de travail spécifiques performants maintenus en permanence au meilleur niveau
- des équipements et des services complémentaires pour l'accueil de start-up, PME, et PMI
- une formation à la simulation et aux technologies de calcul haute performance
- une capacité d'évaluation et de développement en matière de technologie

Le TGCC accueille depuis 2016 la nouvelle machine COBALT du Centre de Calcul Recherche et Technologie (CCRT) du CEA. Cette machine de 1,5 pétaflops, fabriquée par ATOS/Bull, est spécifiquement financée et utilisée par les industriels.

Le Laser Mégajoule (LMJ) et PETAL

Conformément à la politique d'ouverture des moyens de la Simulation, approuvée par le Ministre de la Défense en 2002, le LMJ est mis à la disposition de la communauté scientifique européenne pour une fraction de son temps d'exploitation (environ 25 %).

Très vite la communauté civile de la recherche a exprimé le grand intérêt de disposer aussi d'une ligne laser picoseconde c'est à dire à impulsion 1000 fois plus brèves que celles du LMJ ce qui a conduit au lancement officiel en 2005 du projet Péta Watt Aquitaine Laser (PETAL), financé par le Conseil Régional de la Nouvelle Aquitaine, le Ministère de la Recherche et l'Union Européenne.

Le projet PETAL consiste à réaliser un faisceau laser supplémentaire de forte énergie, dont la puissance sera à terme de plusieurs pétawatt (1 million de milliards de watt).

Commencée en 2008, la construction de PETAL s'est terminée en 2017. Le 29 Mai 2015 le laser PETAL a délivré une puissance de 1,2 PW devenant ainsi le plus puissant laser au monde dans la catégorie des lasers énergétique.

Plusieurs diagnostics spécifiques ont été développés dans le cadre de l'Equipe PETAL+ (projet ANR), ce qui a permis de réaliser la première campagne expérimentale, dédiée à l'astrophysique fin 2017.

L'installation LMJ/PETAL constitue une installation unique en Europe offrant à la communauté académique un outil d'avant-garde pour explorer de nouveaux champs de recherche :

La physique de l'extrême

PETAL conduit à créer des champs électromagnétiques hors du commun. Ceci permet d'aborder des secteurs inexplorés de la physique des hautes densités d'énergie et de réaliser des études de physique fondamentale de très haut niveau, en physique nucléaire par exemple.

La connaissance de l'univers

PETAL permet de recréer en laboratoire des conditions physiques exceptionnelles qui existent au cœur des étoiles et donc d'étudier en laboratoire le comportement de la matière dans ces conditions spécifiques.

L'étude de l'allumage pour la fusion thermonucléaire

Une voie futuriste de production d'énergie par fusion thermonucléaire repose sur la fusion par confinement inertiel (FCI) grâce aux lasers.

L'installation couplée LMJ/PETAL est un outil indispensable au projet européen HIPER (High Power Laser Energy Research Facility) et contribuera à démontrer la potentialité de schémas originaux (comme l'allumage rapide ou de l'allumage par choc) pour la production d'énergie par FCI.

La recherche médicale

L'exploitation de PETAL offre la possibilité d'obtenir des protons très énergétiques (énergie supérieure à 60 MeV) qui sont nécessaires à la protonthérapie pour le traitement des tumeurs cancéreuses et qui nécessitent des énergies variant de 60 à 250 MeV pour que cette technique soit efficace.



Institut Optique d'Aquitaine

Dès 2003 le CEA, l'Université de Bordeaux-1, l'École Polytechnique, et le CNRS, ont mis en place deux entités : l'Institut Lasers et Plasmas (ILP)¹, et l'Unité Mixte de Recherche (UMR)² CELIA (Centre d'Etudes des Lasers Intenses et Applications) afin de renforcer la recherche académique.

Par ailleurs, la construction, le développement, et la maintenance du LMJ, ont un impact industriel très important. Cet ensemble industriel impliqué dans la construction et les matériaux du LMJ participe avec l'ILP, l'UMR CELIA et le CEA à la constitution du Pôle de Compétitivité « ROUTE DES LASERS » autour du CEA/CESTA., labélisé en 2005.

Le Centre de Ressources Technologiques ALPhANOV labélisé en 2007 constitue un acteur majeur pour le transfert technologique dans le Pôle. ALPhANOV permet aux industriels et aux laboratoires de recherche de travailler ensemble.

La construction en 2012 de l'Institut d'Optique d'Aquitaine par le Conseil Régional offre une nouvelle opportunité pour la filière, avec un lieu unique permettant de réunir un fort potentiel technologique et d'assurer une formation de haut niveau : cet institut accueille la plateforme ALPhANOV et ses partenaires des laboratoires et industriels ainsi que l'institut d'Optique Graduate School.

Aujourd'hui, toutes les conditions d'attractivité et de croissance sont donc réunies pour une offre technologique du meilleur niveau en optique, photonique, et laser à l'industrie française pour des applications médicales, industrielles et scientifiques, mais aussi pour le développement d'équipements ou de système pour la Défense.

6. CONCLUSION

Pour assurer la pérennité de la dissuasion nucléaire française en l'absence de nouveaux essais, le CEA a mis en place le programme Simulation qui repose sur des moyens d'expérimentation, LMJ et EPURE en particulier, associés à des moyens de calculs scientifiques parmi les plus performants actuellement dans le monde.

Le programme Simulation, lancé en 1996, a été parfaitement réalisé en termes de délais, performances et coût au profit des programmes des têtes nucléaires aéroportée TNA et océanique TNO. Ce programme est entré dans une phase d'exploitation et d'approfondissement depuis plusieurs années.

La machine radiographique AIRIX puis l'installation EPURE, le laser Mégajoule après son prototype, la LIL, ainsi que les supercalculateurs TERA constituent des réalisations exceptionnelles à la fois par leurs caractéristiques techniques et par leurs performances.

Les progrès associés se sont concrétisés par l'homologation du standard de garantie 2017, plus précis que le précédent (2010) et premier standard exploitant les résultats du LMJ et de EPURE.

Conformément à la politique d'ouverture approuvée en 2002 par le ministère de la Défense, ces moyens expérimentaux et de calculs sont mis à la disposition de la communauté scientifique et de l'industrie.

Cette ouverture permet l'évaluation scientifique extérieure et favorise l'échange des connaissances. Elle est indispensable à la crédibilité scientifique de la DAM, et donc à celle de la dissuasion française, en l'absence d'essais nucléaires.

¹(ILP) Structure nationale ayant pour rôle la fédération et la coordination de l'activité des laboratoires nationaux dans les domaines lasers et plasmas denses et chauds, l'organisation des relations avec les communautés civiles et les expériences ouvertes, la promotion et l'organisation de la valorisation et du transfert industriel, des actions d'enseignement et de formation

²(UMR) Structure régionale de recherche, qui effectuera des travaux en collaboration sur des thèmes précis, d'une part sur les plasmas denses et chauds, d'autre part dans des domaines de l'optique et des lasers