

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.

Après l'arrêt définitif des essais nucléaires, il a pour mission de garantir à la France la pérennité de sa capacité de dissuasion en s'appuyant sur un programme de simulation.

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, Jacques 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 signature et la ratification du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE)
- le démantèlement du Centre d'Expérimentation du Pacifique
- le lancement du programme de Simulation.

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 sera de même pour la composante océanique lors du remplacement de la TN75 par la TNO (Tête Nucléaire Océanique).

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, 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, est pleinement opérationnel au profit des concepteurs d'armes depuis début 2011. Depuis cette date TERA 100 est utilisé avec le standard de garantie 2010 pour tous les travaux de garantie du fonctionnement des armes.

Puis fin 2015 le super calculateur TERA 1000 qui atteindra une puissance 20 fois supérieure a été installé. Mais il a fallu valider expérimentalement ce standard pour avoir la garantie de l'énergie et de la sûreté d'une arme nucléaire.

Cette validation est obtenue aujourd'hui en confrontant les prédictions du standard aux mesures recueillies lors des essais nucléaires passés et aux expériences de validation réalisées sur la machine radiographique AIRIX et la ligne d'intégration laser (LIL) et demain sur l'installation EPURE et le LMJ.

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 fonctions de rentrée atmosphérique et de furtivité de la TNO.

4. LES OUTILS DE LA SIMULATION

4.1 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 mécanique (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.

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 mis en service en octobre 2014.



Machine AIRIX

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.

Cette réalisation s'est faite 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



Représentation de l'installation Epure

4 2 LMJ (Laser Mégajoule)

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

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

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

L'utilisation du LMJ doit permettre en particulier :

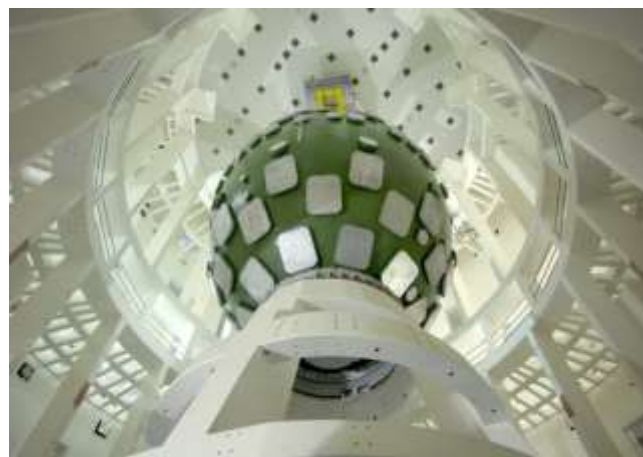
- de valider les modèles fondamentaux (équations de physique) décrivant la physique du fonctionnement des armes nucléaires et de vérifier que la modélisation prend bien en compte la totalité des phénomènes mis en jeu,
- de réaliser des expériences mettant en jeu l'enchaînement et l'imbrication de ces 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'obtenir la fusion par confinement inertiel (FCI).



Bâtiment LMJ

Trois types d'expériences seront 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



Chambre d'expérience LMJ

Le LMJ devait comporter jusqu'à 240 faisceaux laser, d'une puissance totale de 500 térawatts, 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 8 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 million 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 mise en service de cette première chaîne laser marquera le début de la montée progressive en puissance de l'installation.

4 3 TERA

Le super ordinateur TERA est au centre du programme de simulation : il doit permettre de reproduire par le calcul les différentes étapes du fonctionnement d'une arme nucléaire. La modélisation permet notamment d'accéder 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 avait prévu l'acquisition de 3 calculateurs : Calculateur TERA 100 – Photo CEA/DAM-BULL

- TERA, en 2001, constitué de 640 ordinateurs (Hewlett Packard, américains) de puissance totale
- 5 Téraflopes (1 Téraflope = 1000 milliards d'opérations flottantes par seconde)
- TERA 10, acheté en 2005, constitué de 8000 processeurs de puissance totale 62 Téraflopes et fabriqué par BULL
- TERA 100, devenu opérationnel au premier trimestre 2011 ; il remplace TERA 10 dont il occupe les mêmes bâtiments. Sa capacité de calcul de plus d'un Pétaflope (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 Pétaflope

Depuis le début de 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. Mais une augmentation importante de la puissance de calcul sera nécessaire pour accompagner l'évolution des standards de garantie en réponse aux besoins de la Défense d'où l'acquisition de TERA 1000.

TERA 1000

Depuis fin 2015 TERA 1000 constitue la quatrième étape qui lève les premiers verrous technologiques de l'Exaflopes (1 milliard de milliards d'opérations par seconde).

TERA 1000 est mis en service par parties pour atteindre en 2017 une puissance de calcul de 25 Pflopes soit 20 fois supérieur à TERA 100 pour une même consommation énergétique et préfigure la machine EXA1 de classe exaflopie dont la mise en service est prévue vers 2020.

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, va permettre 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.

5.1. LES MOYENS NUMÉRIQUES DU TGCC

Autour du centre DAM/Ile 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, SNECMA, PME, PMI) : le TGCC (Très Grand Centre de Calcul du CEA) qui a accueilli fin 2011 le super ordinateur pétaflopie européen Curie de 2 Pétaflopes.

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 2012 la nouvelle machine AIRIN du CCRT (Centre de Calcul Recherche et Technologie du CEA). Cette machine fabriquée par Bull a vu récemment sa puissance accrue pour atteindre 400 Téraflops ; elle est spécifiquement financée et utilisée par les industriels.

5.2. LE LASER MÉGAJoule (LMJ) et PETAL

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 plus brèves que celles du LMJ ce qui a conduit au lancement officiel en 2005 du projet PETawatt Aquitaine Laser (PETAL), laser qui sera couplé au LMJ.

Le laser PETAL implanté auprès du laser Mégajoule s'inscrit dans la dynamique d'ouverture et de partage de l'utilisation du laser Mégajoule avec la communauté civile de la recherche. Aucun laser de la classe de PETAL n'avait été conçu et réalisé auparavant.

Le projet PETAL consiste à réaliser un faisceau laser supplémentaire aux 176 faisceaux du LMJ, dont la puissance sera de l'ordre d'une dizaine de PétaWatts (1 PetaWatt (PW)= 1 million de milliards de Watts).

En 2011 s'est achevé le montage des infrastructures, fin 2013 fin des installations des systèmes de transports et de focalisation au centre de la chambre d'expérience du LMJ.

Les premières expériences sur le LMJ ont été réalisées fin 2014, 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.

Le couplage de PETAL et du LMJ constitue un très grand instrument de recherche civil unique en Europe pour les études sur la fusion par confinement inertiel, la connaissance de l'univers et la recherche médicale.

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

La physique de l'extrême

PETAL va conduire à créer des champs électromagnétiques hors du commun. Ceci permettra 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 permettra 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 grâce aux lasers. L'installation couplée PETAL et LMJ sera un outil indispensable au projet européen HIPER (High Power Laser Energy Research Facility) en contribuant à démontrer la potentialité de l'allumage rapide de la fusion ou par chocs pour la production d'énergie par fusion par confinement inertiel et à maîtriser l'ensemble des processus conduisant à la fusion.

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 250MeV pour que cette technique soit efficace.

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.

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.

Le développement industriel autour du LMJ

La construction, le développement et le maintien 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 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 accueillera 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 un programme de simulation basé 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 de 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, le laser Mégajoule après son prototype, la LIL, ainsi que le superordinateur TERA constituent des réalisations exceptionnelles à la fois par leurs caractéristiques techniques et par leurs performances.

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.