

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, 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 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 nouvelles TNA (Têtes Nucléaires Aéroportées) ont commencé à être mises en service 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) sont 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.

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
- la validation des écarts dus à la militarisation des charges nucléaires ainsi conçues, ou susceptibles d'apparaître au cours de la vie opérationnelle de l'arme. Cette validation sera faite grâce à la simulation
- la formation et la certification des nouvelles équipes, qui n'auront pas connu les essais nucléaires

La simulation consiste à reproduire par le calcul les différentes phases du fonctionnement d'une arme nucléaire.

Pour atteindre cet objectif, le programme Simulation a été construit autour de trois volets : la modélisation des phénomènes physiques, la simulation sur ordinateur, et la validation expérimentale.

Tant qu'il était possible de réaliser des essais, on pouvait admettre un certain empirisme des modèles physiques et numériques décrivant le fonctionnement de l'arme.

Cela n'est plus possible maintenant. Il faut donc mettre au point des modèles prédictifs représentant plus finement tous les phénomènes mis en jeu afin d'en évaluer précisément les conséquences. Il faut disposer ensuite de codes numériques permettant la prise en compte de ces modèles. Leur utilisation nécessite des ordinateurs de plus en plus puissants, tant en taille mémoire qu'en rapidité de calcul. Le programme d'acquisition de super calculateurs de type TERA répond à ce besoin.

La validation de ces logiciels ne peut se faire qu'avec de nouvelles installations expérimentales permettant :

- des mesures beaucoup plus précises qu'auparavant
- d'aborder en laboratoire des phénomènes physiques qu'il n'était possible d'étudier que très indirectement à travers les essais nucléaires

Les deux outils expérimentaux majeurs du programme Simulation sont la machine radiographique AIRIX et le laser Mégajoule (LMJ).

La validation de la chaîne de calcul dans sa globalité sera réalisée grâce à la réinterprétation des essais nucléaires passés.

4. LES OUTILS DE LA SIMULATION

- **AIRIX** (Accélérateur à Induction de Radiographie pour l'Imagerie X)



AIRIX est une machine à rayons X, installée à Moronvilliers en Champagne, qui a pour mission de valider les modèles relatifs à la phase de mise en condition par explosif chimique (phénomènes pyrotechniques + hydrodynamiques).

Les expériences sont réalisées en remplaçant les matériaux nucléaires par des matériaux inertes aux comportements mécaniques et thermiques très proches. 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 devant être fermé, AIRIX sera transporté et implanté (date visée 2013) sur le site CEA/DAM de Valduc. avec un premier axe radiographique de l'installation conjointe Franco-Britannique du programme Teutates-epure (programme d'installations expérimentales) dont le démarrage est prévu dans les années à venir. On notera que ce programme avait été initié et décidé avant l'accord de coopération Franco-Britannique.

- **LMJ** (Laser Mégajoule)



Le LMJ, en cours de construction au CESTA, 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.

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

Le LMJ permettra de valider à la fois les modèles et les logiciels utilisés dans la simulation numérique ainsi que les compétences des physiciens chargés d'apporter la garantie de fonctionnement de l'arme.

Il 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 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.

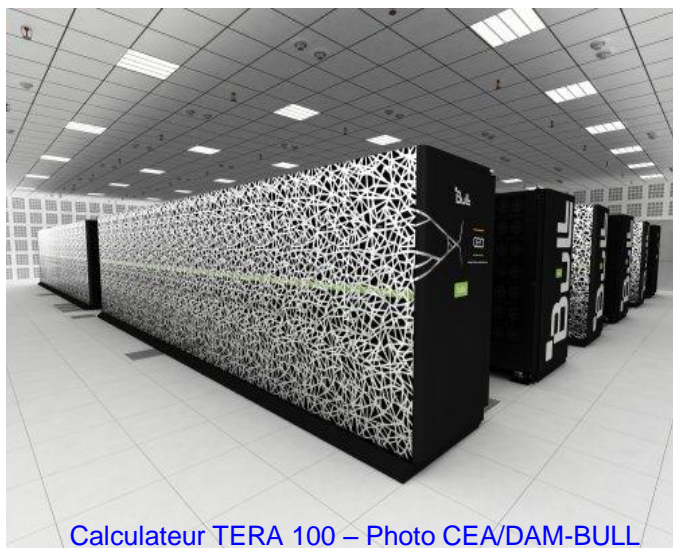
• TERA

Le super calculateur 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 :

- TERA, en 2001, constitué de 640 ordinateurs (Hewlett Packard, américains) de puissance totale 5 téraflops (1 téraflop=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 ; il remplace TERA-10 dont il occupe les mêmes bâtiments. Sa capacité de calcul de plus d'un pétaflop (million de milliards d'opérations par seconde) le situe comme le plus puissant calculateur d'Europe.



Calculateur TERA 100 – Photo CEA/DAM-BULL

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 TERA, le laser mégajoule LMJ et l'accélérateur à induction de radiographie pour imagerie X, 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 TERA

Autour du centre DAM/Ile de France est développé un pôle de compétence sur le calcul de hautes performances dans le cadre du projet **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 accueillera fin 2011 un super ordinateur pétaflopique européen.

Il proposera :

- 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 laser mégajoule (LMJ)

Implanté en Aquitaine (centre CESTA), c'est une installation qui fournira à l'aide de 176 faisceaux laser de très forte puissance plusieurs centaines de térawatts (1 térawatt = 1 million de millions de watts). Le laser mégajoule (LMJ) et son prototype, la ligne d'intégration laser (LIL), mettront leurs performances à la disposition de la communauté scientifique européenne qui disposera alors de moyens expérimentaux uniques dans le monde : le LMJ, dont les premières expériences commenceront en 2014, deviendra dans les années suivantes le plus puissant laser existant avec le NIF (National Ignition Facility) américain.



Bâtiment du LMJ en 2008 – Photo CEA/DAM

La LIL

La LIL (dont les premières expériences ouvertes datent de fin 2005) et le LMJ ouvriront aux chercheurs un champ d'investigation nouveau dans des disciplines fondamentales telles que la physique des plasmas (fusion thermonucléaire contrôlée), la physique atomique des ions multichargés, l'interaction rayonnement – matière, la physique nucléaire.

PETAL

De plus, le laser pétawatts **PETAL** (fin de construction des infrastructures en septembre 2011) sera couplé en 2014 au LMJ dans le but d'approfondir la physique dans les conditions extrêmes des expériences : c'est un laser de haute énergie et très haute puissance générant des impulsions de 3,5 kilojoules durant 0,5 à 5 picosecondes (un millionième de millionième de seconde). Il sera l'outil indispensable pour le projet européen HIPER, dont l'objectif est de démontrer la potentialité de la fusion par confinement inertiel par laser comme technique de production d'énergie.

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. De plus, la construction, le développement, et le maintien du LMJ, ont un impact industriel très important.

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.

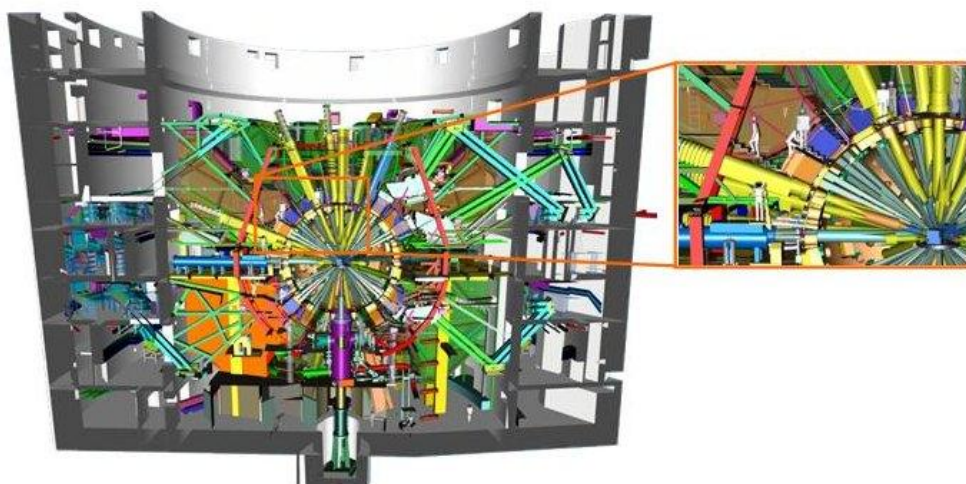
Cet ensemble industriel impliqué dans la construction et les matériaux du LMJ participe avec l'ILP, l'UMR et le CEA à la constitution du pôle de compétitivité « ROUTE DES LASERS » autour du CEA/CESTA.

L'accélérateur à induction de radiographie pour imagerie X (AIRIX).

Le Polygone d'Expérimentation de Moronvilliers (PEM) réalise des expérimentations de détonique. Il est doté à cet effet de différents instruments (AIRIX en particulier).

L'optimisation de ces moyens et la mise au point des techniques associées ont conduit à bâtir des collaborations suivies (thésards) avec l'Université. Le PEM réalise également des mesures au profit d'applications industrielles.

**L'équipement du Hall d'Expérience est très complexe.
Il a été conçu à l'aide d'une maquette numérique**



LMJ – Document CEA/DAM

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 AIRIX en particulier, associés à des moyens de calculs scientifiques parmi les plus performants actuellement dans le monde.

Le laser Mégajoule et 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.