

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 qui équipent les forces nucléaires aéroportées et océaniques françaises.

Depuis l'arrêt définitif des essais nucléaires français, les têtes nucléaires, appelées à remplacer les armes en service arrivant en fin de vie, sont désormais 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 avec 6 essais qui s'est déroulée de septembre 1995 à janvier 1996. Au total 210 expérimentations nucléaires ont été réalisées.

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'à la mise en service de la TN75, au milieu des années 90, 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. Les lois de programmation militaire 2019-2025 et 2024-2030 ont confirmé le renouvellement des deux composantes de notre dissuasion qui seront comme la TNA et la TNO garanties par le programme simulation.

3. COMMENT GARANTIR LE FONCTIONNEMENT DES ARMES FUTURES DANS 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 fait de l'évolution naturelle de certains matériaux et composants mis en œuvre dans la composition de l'arme (dont les matériaux nucléaires). Leur durée de vie est donc limitée, et leur renouvellement est nécessaire pour assurer la continuité de la dissuasion.

Par ailleurs, les têtes nucléaires doivent être adaptées aux nouveaux missiles qui les délivrent et doivent évoluer pour faire face aux nouvelles défenses qui leur sont opposées. 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 les moyens de garantir par une démarche de simulation leur fonctionnement et leur sûreté.

Cette stratégie repose sur trois éléments :

- le concept de charges robustes, dont le principe vise à retenir un point de fonctionnement suffisamment éloigné des seuils de fonctionnement et suffisamment peu sensible aux variations technologiques pour être compatibles avec l'utilisation de codes de calcul présentant des incertitudes. Ce concept 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.

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 tête nucléaire. Ainsi fin 2011 a été prononcée l'homologation des premiers standards de calcul pour les autres fonctions que l'énergie (furtivité, rentrée atmosphérique, ...). Le processus s'est poursuivi depuis avec une nouvelle version de ces standards, homologuée en 2022, en lien avec le besoin de renouvellement des composantes et intégrant les nouveaux résultats obtenus sur les installations expérimentales de la DAM.

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.

4. LES OUTILS DE SIMULATION

- **EPURE** (Expérimentation de Physique Utilisant la Radiographie Eclair)

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

EPURE est en exploitation depuis cette date et les expériences réalisées avec les matériaux constituant les armes apportent des données expérimentales de grande qualité pour contraindre les modélisations physiques mises en jeu dans les standards de garantie. Depuis, les capacités de l'installation ont été améliorées et elle s'est récemment dotée de deux axes radiographiques supplémentaires de forte puissance qui permettent 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 va donc être possible à court terme 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. De même la France a accès au centre de l'Atomic Weapons Establishment à Aldermaston pour des développements technologiques communs.



EPURE, Centre de Valduc

- **LMJ** (Laser Mégajoule)

Le LMJ, est indispensable pour simuler le fonctionnement nucléaire de l'arme.

Après l'arrêt définitif des essais nucléaires, la garantie du fonctionnement et de la sûreté des armes de la dissuasion nucléaire française est désormais apportée, pendant toute leur durée de vie, *via* le programme Simulation. Pour que la simulation soit efficace, deux conditions doivent être remplies :

- disposer de logiciels de calcul qualifiés, prenant en compte des modèles physiques validés en laboratoire et simulant le fonctionnement des armes,
- disposer d'équipes de physiciens qualifiés pour utiliser ces logiciels.

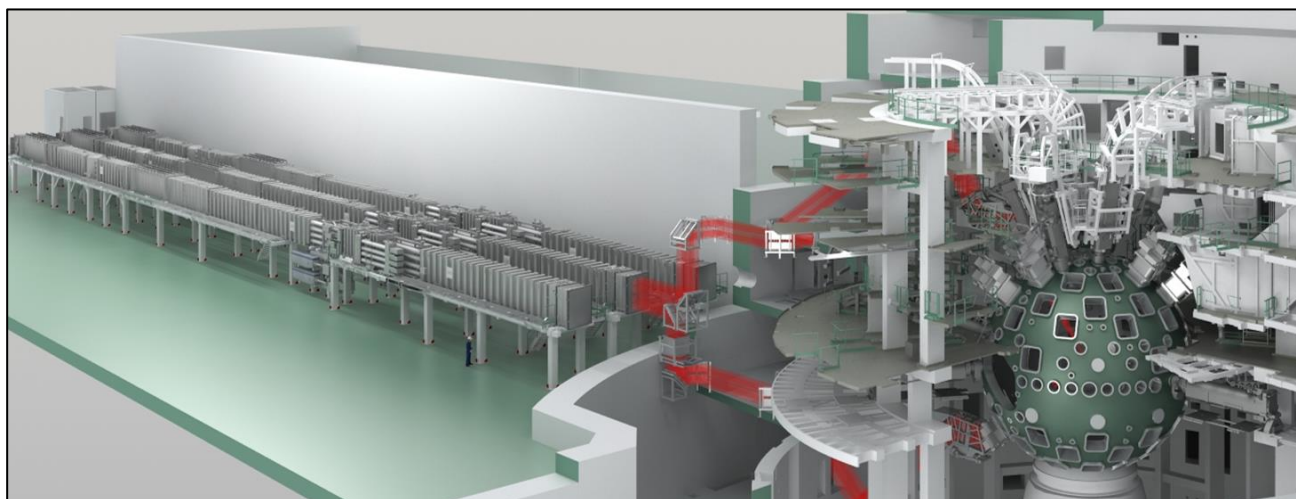


Bâtiment LMJ

Le laser Mégajoule (LMJ) est indispensable pour remplir ces deux conditions, puisqu'il permet de valider les codes de simulation numériques et de certifier les compétences des physiciens français.

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.



Chaînes laser et chambre d'expérience du LMJ

L'utilisation du LMJ permet en particulier :

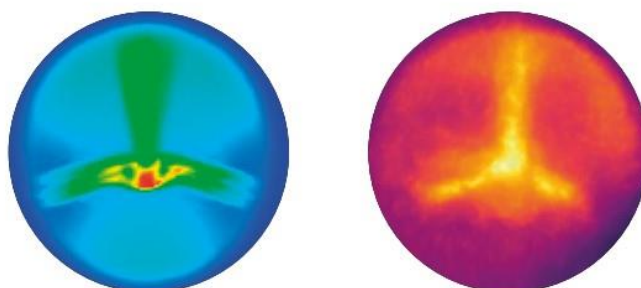
- de valider les modèles fondamentaux décrivant la physique du fonctionnement des armes nucléaires et de vérifier que la modélisation prend bien en compte la totalité des phénomènes mis en jeu,
- de réaliser des expériences mettant en jeu l'enchaînement et l'imbrication de ces modèles. Ces expériences 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.

Dans la configuration finale du LMJ, 176 faisceaux délivrant une énergie totale de 1,3 MJ seront focalisés sur la cible placée au centre de la chambre d'expériences. Depuis sa mise en service en 2014, la montée en puissance progressive du Laser Mégajoule se poursuit, de manière cohérente entre l'énergie laser (mise en service des faisceaux laser) et le système expérimental (une quarantaine de systèmes de mesure ou diagnostics seront installés à terme).

La première campagne expérimentale de physique des armes a été réalisée en 2014 avec une chaîne laser (8 faisceaux). En octobre 2019, 48 faisceaux laser ont été mis en œuvre simultanément pendant 3 milliardièmes de seconde sur une microcible pour réussir la première expérience de fusion nucléaire au Laser Mégajoule. Cette microcible était composée d'une cavité en or contenant une bille remplie de deutérium.



Imagerie X simulée (gauche) et expérimentale (droite) au démarrage des réactions de fusion

Cette expérience a été dimensionnée par un calcul de prévision en trois dimensions. En accord avec les prévisions, plusieurs centaines de milliards de neutrons de fusion ont été mesurés.

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

Fin 2023, le LMJ dispose de 13 chaînes laser (104 faisceaux) opérationnelles pour réaliser les expériences de physique nécessaires à la mise au point des standards de garantie des armes, et de plus de 20 diagnostics de mesure.

- **Les calculateurs TERA et EXA**

Les super calculateurs sont 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 demandant plus de puissance de calcul. Pour répondre à ce besoin croissant de ressources calcul, la DAM a augmenté très significativement les capacités de son centre de calcul localisé au CEA DAM-Ile-de-France. En effet, 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 et maintenir des temps de calcul raisonnables, compatibles avec les échéances des programmes.

De 2001 à 2017, le passage des calculateurs TERA1 à TERA1000 a permis de multiplier par 500 la puissance en Flops (nombre d'opérations de calcul par seconde) disponible pour les physiciens et a nécessité le développement de nouveaux outils de simulations adaptés à ces calculateurs massivement parallèles.

La prochaine étape sera d'atteindre des capacités de classe exaflopiques (milliard de milliards d'opérations par seconde) ce qui ne sera pas possible sans une rupture technologique tant au niveau du matériel mis en œuvre que des modèles de programmation et des algorithmes.

La première partition du calculateur EXA1 (d'une puissance de 36 Petaflops) est en service depuis 2021 et a permis de prononcer l'homologation du plus récent standard de simulation des armes. Elle sera complétée en 2024 par une partition hybride couplant des processeurs classiques avec des processeurs graphiques et mettra en œuvre les nouvelles technologies des calculateurs exaflopiques.



EXA1, centre DAM Ile de France

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 héberge le calculateur européen Joliot-Curie de 12 petaflops, destiné à la recherche académique, et le calculateur Topaze du Centre de Calcul Recherche et Technologie (CCRT). Ce dernier, spécifiquement financé et utilisé par les industriels, possède une partition GPU (Graphic Processor Unit) de 3,7 petaflops et une partition classique CPU (Central Processor Unit) de 4 petaflops. En 2023, le TGCC a été sélectionné dans le cadre d'un appel à projet européen pour accueillir un calculateur exaflopique à l'horizon 2025.

Le CEA est pleinement impliqué dans la stratégie nationale pour les technologies quantiques. Dès 2018, un émulateur de calculateur quantique d'ATOS était mis à disposition des partenaires du CCRT et, plus récemment, la DAM a été chargée de mettre en œuvre une plateforme hybride classique/quantique au TGCC dans le cadre du programme national HQI (Hybrid Quantum Initiative).

- **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.

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 1 000 fois plus brève que celles du LMJ ce qui a conduit au lancement officiel en 2005 du projet PETawatt 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 petawatt (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 énergétiques.

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'ensemble des diagnostics devrait être disponible en 2024.

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 (physique de l'extrême, connaissance de l'univers, recherche médicale...).



Depuis 2021, cette infrastructure figure dans la feuille de route des infrastructures nationales de recherche, éditée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et, après une première campagne expérimentale, dédiée à l'astrophysique en 2017, environ 25 % du temps d'expérience a été consacré à des campagnes expérimentales sélectionnées par un comité scientifique international.

◀ **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 « ALPHA RLH (Route des Lasers et des Hyperfréquences) » autour du CEA/CESTA, labélisé depuis 2005. Le Centre de Ressources Technologiques Optique et Lasers ALPhANOV labélisé en 2007 constitue un acteur majeur pour le transfert technologique dans le Pôle, il 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 ainsi que les supercalculateurs constituent des réalisations exceptionnelles du programme à la fois par leurs caractéristiques techniques et par leurs performances.

Les progrès associés se sont concrétisés par l'homologation du nouveau standard de garantie 2022, intégrant les résultats obtenus au LMJ et à EPURE et exploité sur le calculateur EXA1.

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.

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).

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.

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