TEUTATES

10 ANS

DE COOPÉRATION FRANCO-BRITANNIQUE

cea

Ministry of Defence

AWE

SOM

1. LE PROGRAMME TEUTATES, 10 ANS APRÈS LA SIGNATURE DU TRAITÉ DE LANCASTER HOUSE

- Une coopération franco-britannique inédite et ambitieuse
- EPURE, une plateforme de radiographie tridimensionnelle unique au monde

2. L'INSTALLATION FRANCO-BRITANNIQUE EPURE À VALDUC

- La description de l'installation
- Les trois machines radiographiques
- L'enregistrement des images radiographiques
- Les dispositifs de confinement des expériences

MAIRE

3. LA RÉALISATION DES EXPÉRIENCES SUR EPURE

- Une exploitation franco-britannique de l'installation
- Le déroulement d'une expérience à un axe radiographique
- Les futures expériences à trois axes radiographiques

1

Le programme TEUTATES, 10 ans après la signature du traité de Lancaster House

Par Vincenzo Salvetti, Directeur des applications militaires du CEA et Vanessa Nicholls, UK MOD Director General Nuclear

Signature des Accords de Lancaster House par le président français Nicolas Sarkozy et le premier ministre britannique David Cameron lors du sommet franco-britannique de Londres le 2 novembre 2010.

© Prime Minister's Office

UNE COOPÉRATION FRANCO-BRITANNIQUE INÉDITE ET AMBITIEUSE

Le traité TEUTATES a été signé entre la France et le Royaume-Uni à Lancaster House, à Londres le 2 novembre 2010 par le président de la République française et le premier ministre britannique. Ce traité matérialise la coopération franco-britannique sur le nucléaire de défense. Il a été signé le même jour que le « Traité de coopération en matière de sécurité et de défense » qui réunit également la France et le Royaume-Uni et dont les objectifs sont plus larges. TEUTATES porte sur les technologies liées aux programmes de renouvellement des armes et permet de maintenir les capacités de dissuasion nucléaire de nos deux pays.

Cette coopération est en totale conformité avec les exigences du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE)[1]. Tout en tenant compte de leurs obligations vis-à-vis du TICE, nos deux pays avaient besoin de mettre en œuvre des expériences et de développer des installations hydrodynamiques et radiographiques qui leur permettent de garantir la sûreté, la fiabilité et la performance de leurs armes nucléaires respectives en l'absence d'essais nucléaires nouveaux.

Après une étude commune, il s'est avéré que les besoins techniques et calendaires étaient très similaires pour chacun de nos deux pays et que la construction et l'exploitation d'un seul ensemble d'installations hydrodynamiques, plutôt que des installations nationales, pourraient satisfaire aux attentes franco-britanniques avec un coût total moindre. C'est pour cette raison que les gouvernements français et britannique ont décidé il y a 10 ans d'unir leurs efforts et de coopérer dans le cadre du programme TEUTATES. **Celui-ci a permis de générer d'importantes économies et de partager les connaissances et l'expertise des scientifiques et des experts de nos deux pays** en matière de recherche et de technologie dans le domaine de l'hydrodynamique.

Le programme TEUTATES comprend ainsi la construction et l'exploitation commune, en France, d'une installation hydrodynamique et radiographique, EPURE, située sur le site de Valduc de la Direction des Applications Militaires (DAM) du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). Les expériences menées sur EPURE permettent d'acquérir en laboratoire des données de physique indispensables pour valider les simulations numériques qui servent à garantir la fiabilité et la sûreté des armes nucléaires. **La France et le Royaume-Uni partagent l'installation EPURE.** Cependant, la mise en œuvre des objets et les résultats expérimentaux ne sont pas partagés, ce qui permet à chaque nation de conserver sa souveraineté dans le domaine de la dissuasion.

[1] Le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE) interdit les explosions expérimentales d'armes nucléaires ainsi que toute autre explosion nucléaire.

Installation franco-britannique EPURE sur le site du CEA/DAM de Valduc (vue globale du site).
© CEA/DAM

Plus précisément, les expériences hydrodynamiques sur EPURE sont conçues pour caractériser avec la plus grande précision l'état et le comportement des matières nucléaires, notamment le plutonium, dans les conditions rencontrées durant la phase pré-nucléaire de fonctionnement des armes. En pratique, des explosifs conventionnels à fort pouvoir propulsif sont utilisés pour comprimer la matière, qui se comporte alors comme un fluide. Sur EPURE, on peut étudier ce phénomène en observant, selon un à trois axes radiographiques, comment la compression et les ondes de choc évoluent et comment la matière se comporte. Les expériences sont réalisées en toute sécurité au sein d'une enceinte de confinement étanche. Les images de radiographie éclair du processus d'implosion sont réalisées par de très puissantes machines radiographiques d'un très haut niveau de performance.

TEUTATES inclut également la construction et l'exploitation commune de l'installation de recherche technologique TDC (Technology Development Centre), sur le site de l'Atomic Weapons Establishment (AWE), à Aldermaston au Royaume-Uni.

Au TDC sont développées les briques technologiques des machines radiographiques et des instruments de mesures associés.

La remise à niveau sur le site d'AWE de l'installation d'étude de détonique britannique IFP2 (Interim Firing Point 2) a également été ajoutée au programme TEUTATES par le Président français et le Premier ministre britannique au sommet de Brize Norton le 31 janvier 2014.

Les travaux menés sur toutes ces installations permettent au Royaume-Uni et à la France de disposer d'un ensemble complet de moyens hydrodynamiques et radiographiques respectant le TICE et adaptés pour garantir la sûreté et la fiabilité des têtes nucléaires dans un environnement sécurisé, sans recours à un essai nucléaire.

Ce travail conjoint nous permet de partager les avantages, les coûts et les risques liés à la réalisation de ce programme complexe. **Cette coopération en matière de nucléaire de défense permet à nos deux pays de préserver sur le long terme leurs capacités hydrodynamiques et les technologies associées.**

EPURE, UNE PLATEFORME DE RADIOGRAPHIE TRIDIMENSIONNELLE UNIQUE AU MONDE

Réglage de la machine de radiographie AIRIX par deux opérateurs, un français et un britannique.
© CEA/DAM

Depuis la signature du Traité TEUTATES il y a dix ans par le Président de la République française et le Premier ministre britannique, la coopération sur « les installations radiographiques et hydrodynamiques communes» jugée ambitieuse à l'époque a pris forme, s'est développée et est désormais solidement ancrée de part et d'autre.

Moins de quatre ans après le premier béton coulé en novembre 2010, la France réussissait la première expérience sur EPURE avec le premier axe de radiographie AIRIX en octobre 2014. **Depuis lors, plus de dix expériences françaises ont été réalisées avec succès sur EPURE.**

La mise en service en 2019 des bâtiments de responsabilité britannique, et la livraison hautement sécurisée des matériaux nécessaires aux Britanniques pour cette expérience, ouvre la voie à la réalisation de la première expérience britannique sur EPURE.

En parallèle, au Royaume-Uni, au sein du TDC, ont été développés les gamma-caméras[2] d'EPURE et la machine à rayons X MERLIN[3], qui sera utilisée comme deuxième axe radiographique à EPURE.

En parallèle, la réalisation d'un troisième axe radiographique[4], similaire au premier axe, est réalisée en France, sur le centre CEA/DAM du Cesta. Les deuxième et troisième axes radiographiques seront installés au cours des deux prochaines années et mis en service fin 2022, afin d'être ensuite utilisés sur EPURE à partir de 2023.

Le programme TEUTATES a également scellé une coopération scientifique enrichissante entre la France et le Royaume-Uni qui va se poursuivre dans les années à venir, soutenue par l'enthousiasme des équipes françaises et britanniques qui y participent. Une nouvelle décennie s'ouvre devant elles avec de nouveaux challenges tous aussi ambitieux que ceux relevés durant ces dix premières années.

L'installation EPURE sera donc, d'ici quelques années, l'installation de radiographie X la plus complète au monde, avec trois axes présentant des performances situées au meilleur niveau mondial. EPURE illustre l'excellence technologique et scientifique de la France et du Royaume-Uni, au profit de leurs dissuasions respectives.

Les succès du programme TEUTATES depuis dix ans soulignent le degré de notre engagement mutuel et reflètent la confiance qui existe aujourd'hui entre nos équipes.

Aujourd'hui ancrée sur des bases solides, la coopération franco-britannique autour des installations radiographiques et hydrodynamiques permet à la France et au Royaume-Uni d'être équipés pour assurer sur le long terme, grâce à la simulation, la pérennité et la crédibilité de leur dissuasion nucléaire, dans le strict respect de leurs engagements internationaux.

---

[2] Diagnostic de mesure permettant la visualisation de l'image obtenue à partir du faisceau de rayons X produit par la machine radiographique.

[3] de technologie IVA – Inductive Voltage Adder

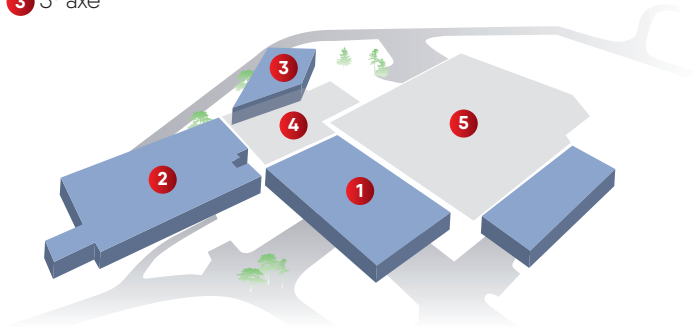
[4] de technologie LIA (Linear Induction Accelerator).

Installation franco-britannique EPURE sur le site du CEA/DAM de Valduc (entrée du bâtiment)
© CEA/DAM

2

L'installation franco-britannique EPURE à Valduc

1. 1er axe
2. 2e axe
3. 3e axe
4. Hall d'experience
5. Zones de travail française et britannique



EPURE dans sa future configuration à 3 axes

LA DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

Une installation hydrodynamique de radiographie éclair est constituée principalement de trois éléments : une machine de radiographie qui produit une source de rayonnement X intense et très brève, une enceinte pour assurer le confinement des matières mises en vitesse dans l'expérience et un détecteur calibré pour enregistrer les images radiographiques avec une très haute précision. L'édifice expérimental dans son enceinte de confinement est placé entre la source de rayonnement et le détecteur.

L'installation de radiographie éclair franco-britannique EPURE comporte des zones communes et des zones réservées respectivement à chaque nation. Pour garantir la souveraineté des expériences qui y sont menées, les zones de préparation des expériences ainsi que les dispositifs d'enregistrement et de récupération des données sont spécifiques à chaque nation. Tout le reste de l'installation est partagé et exploité en commun.

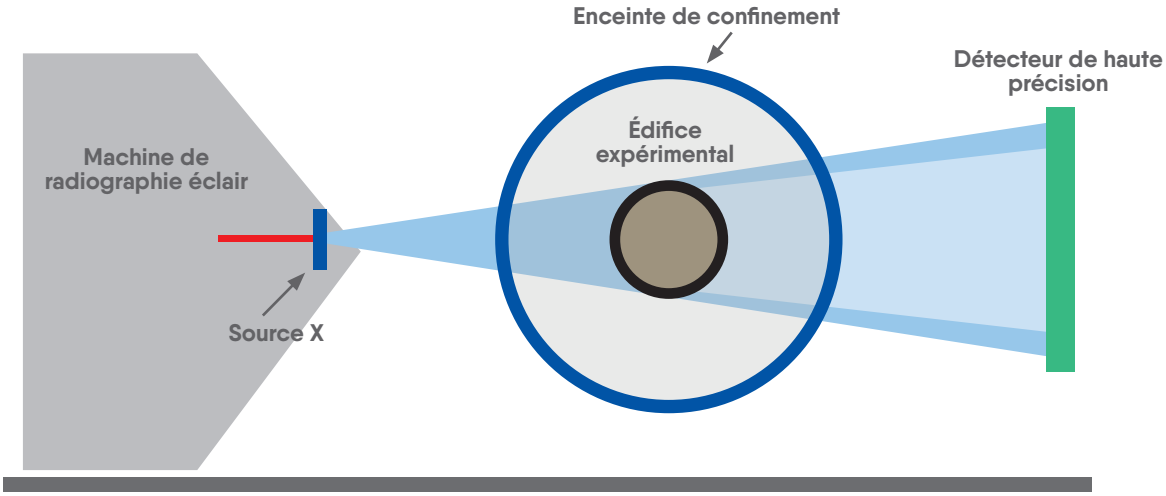


Schéma de principe d'une expérience radiographique sur EPURE

LES TROIS MACHINES RADIOGRAPHIQUES

Une première configuration d'EPURE, permettant de réaliser des expériences françaises, est opérationnelle depuis 2014 avec un premier axe de radiographie. Cette configuration comprend un hall d'assemblage[5] français, une zone de stockage des explosifs français, un point d'expérimentation équipé aujourd'hui d'un axe radiographique unique, ainsi qu'un bâtiment de maintenance de la machine radiographique. Les résultats obtenus depuis ont contribué à garantir la fiabilité et la sûreté des têtes nucléaires françaises.

Cet ensemble est complété de locaux spécifiques permettant aux Britanniques de réaliser leurs expériences en toute souveraineté (hall d'assemblage, zone de stockage des explosifs et bureaux).

Une extension de cette installation est en cours pour lui adjoindre deux nouveaux axes de radiographie, qui seront reliés à l'installation existante.

La machine AIRIX, qui a été exploitée pendant 13 ans sur le site CEA/DAM de Moronvilliers, a été redéployée en 2013 sur EPURE. La mise en service opérationnel d'AIRIX a pu être prononcée en juillet 2014 pour permettre une première expérience hydrodynamique dans l'installation EPURE en octobre 2014.

La machine AIRIX, de type LIA (Linear Induction Accelerator), fonctionne en forte énergie et bas courant (2 kA) pour fournir les rayons X aux caractéristiques d'intérêts pour les expériences hydrodynamiques. Elle est composée de trois sous-systèmes :

- un injecteur crée d'abord une impulsion d'électrons de 60 ns, avec une énergie de 4 MeV, 2 kA. Pour ce faire, il crée une différence de potentiel de 4 MV entre les deux électrodes d'une diode, sous vide. Un commutateur délivre alors la tension requise dans les lignes de mise en forme de l'impulsion, puis enfin l'extraction des électrons est réalisée à partir d'une cathode en velours ;
- le faisceau est accéléré à travers 64 cellules à induction qui font passer l'énergie des électrons de 4 à 20 MeV. Les générateurs de haute tension (250 kV) servent à créer les champs électriques nécessaires pour accélérer les électrons. Pendant l'accélération, les champs magnétiques sont utilisés pour régler et centrer le faisceau dans la machine ;
- au final, les bobines à induction servent à focaliser le faisceau vers une petite surface de la cible de tantale où l'énergie du faisceau est convertie en rayons X. La focalisation la plus fine est nécessaire

[5] Il s'agit de l'assemblage de l'objet expérimental dans son enceinte de confinement.

afin d'obtenir une image radiographique haute résolution de l'objet étudié.

Conçue pour traverser les matériaux très denses qui implosent, la machine AIRIX est capable de délivrer une dose de 600 rad à 1 mètre sur quelques dizaines de nanosecondes. **Cela représente une dose plusieurs dizaines de milliers de fois supérieure à la dose d'une radiographie médicale.**

L'un des deux futurs axes supplémentaires d'EPURE utilise la même technologie LIA que la machine AIRIX et a pu bénéficier du retour d'expérience de l'installation et de l'exploitation d'AIRIX à Moronvilliers puis à EPURE. Cette machine ne diffère vraiment d'AIRIX que dans sa partie terminale, l'espace de focalisation et de conversion (qui est fixe sur AIRIX) étant mobile afin de faciliter l'accès aux équipements dans le hall d'expérience. Les principaux composants de cette machine, injecteurs, générateurs haute tension et cellules à induction, ont été qualifiés ou sont en cours de qualification sur le site CEA/DAM du Cesta, près de Bordeaux.

La dernière des trois machines radiographiques, MERLIN, de type IVA (Inductive Voltage Adder), fonctionne sur un mode basse énergie et haut courant (200 kA) pour fournir des rayons X d'intérêt. Ce mode est différent de celui des machines LIA (forte énergie et bas courant (2 kA).

L'énergie électrique nécessaire à son fonctionnement est accumulée dans un générateur de Marx. Cette énergie est ensuite

Machine de radiographie X éclair AIRIX au sein de l'installation EPURE
© CEA/DAM

Tests sur le site CEA/DAM du CESTA de composants de la troisième machine de radiographie éclair.
© CEA/DAM

Machine de radiographie X éclair MERLIN en test au TDC
© Ministry of Defence

déchargée au travers une série de 10 lignes de mise en forme (ou PFL) dans un conducteur central. La technologie IVA permet d'appliquer la somme de leurs tensions de sortie à une charge à l'aide des cellules à induction et d'alimenter une diode à faisceau d'électrons située la partie terminale de la machine qui transforme le fort courant électrique en rayons X. MERLIN fournit un faisceau de rayons X comparable à celui des machines LIA.

Contrairement aux deux machines LIA qui sont fixes dans l'installation EPURE, la machine MERLIN sera mobile. Elle se déplacera entre sa position opérationnelle pour réaliser des expériences et sa position reculée pour réaliser les opérations nécessaires à sa maintenance et son réglage entre chaque expérience. Pour cela elle sera montée à EPURE sur une plateforme de mobilité rigide qui se déplace sur coussin d'air et qui a été testée et validée au cours de l'année 2019 au Royaume-Uni. La machine MERLIN et la plateforme de mobilité sont actuellement en cours de montage dans l'installation EPURE.

La machine MERLIN a été qualifiée au TDC à Aldermaston entre 2015 et début 2019. Son démontage a débuté en avril 2019, avant son transfert et son remontage à EPURE à partir de 2020.

EPURE disposera bientôt d'une capacité unique au monde permettant de réaliser des images d'expériences d'hydrodynamique rapide selon 3 axes radiographiques différents au service des programmes de dissuasion nucléaire de la France et du Royaume-Uni.

L'ENREGISTREMENT DES IMAGES RADIOGRAPHIQUES

La radiographie X éclair permet de réaliser des « photographies » précises de la matière soumise à des vitesses de déformations extrêmes (quelques milliers de kilomètres par seconde) grâce à une source de rayons X de haute énergie pulsé (ou « éclair »).

L'enregistrement de ces images radiographiques se fait au moyen de détecteurs appelés « gamma caméra », spécialement développés pour EPURE. Ce développement a bénéficié des savoir-faire des équipes franco-britanniques.

Pour les besoins de leurs programmes respectifs de dissuasion nucléaire, l'AWE et le CEA/DAM ont besoin d'extraire de ces images radiographiques des informations d'une très grande précision. Il s'agit notamment de caractériser des interfaces entre des matériaux ou de réaliser une cartographie spatiale de la densité des matériaux. Il est donc important que la chaîne de mesure radiographique soit optimisée pour obtenir une image radiographique de haute qualité et que les sources de rayonnement X soient bien caractérisées.

La chaîne de radiographie est réglée et optimisée en fonction de l'édifice expérimental et des objectifs de l'expérience. L'optimisation doit prendre en compte à la fois les caractéristiques de la source de rayonnement X (spectre et dose, tache focale, lobe d'émission), celles des détecteurs photo-stimulables et gamma-caméra utilisés (sensibilité, réponses spatiale et spectrale) ainsi que la géométrie et les caractéristiques de l'expérience elle-même.
La conception de la chaîne radiographique, puis le dépouillement des images expérimentales, se basent sur l'utilisation intensive de plusieurs outils de simulation numérique.

Gamma camera pour acquérirles clichés radiographiques
© CEA/DAM

LES DISPOSITIFS DE CONFINEMENT DES EXPÉRIENCES

Les expériences de physique menées sur EPURE visent à décrire le comportement dynamique des matériaux entrant dans la composition de l'arme, lorsqu'ils sont soumis à une forte compression, obtenue par un explosif conventionnel. Certaines de ces expériences peuvent utiliser du Plutonium, mais en quantité beaucoup trop faible pour dégager de l'énergie nucléaire par fission. Ainsi, les édifices expérimentaux utilisés ne sauraient en aucun cas être comparés à des armes nucléaires. Les expériences menées sur EPURE sont donc en totale conformité avec les exigences du Traité d'Interdiction Complète des Essais (TICE), ratifié en 1998 par la France et le Royaume-Uni.

Dans les expériences hydrodynamiques mises en œuvre au sein d'EPURE, des explosifs conventionnels à fort pouvoir propulsif sont utilisés pour comprimer la matière. **Ces expériences sont réalisées en toute sécurité au sein de dispositifs de confinement étanches, certifiés en matière de sûreté nucléaire.**

Ces dispositifs de confinement sont des cuves conçues pour répondre à trois exigences essentielles :

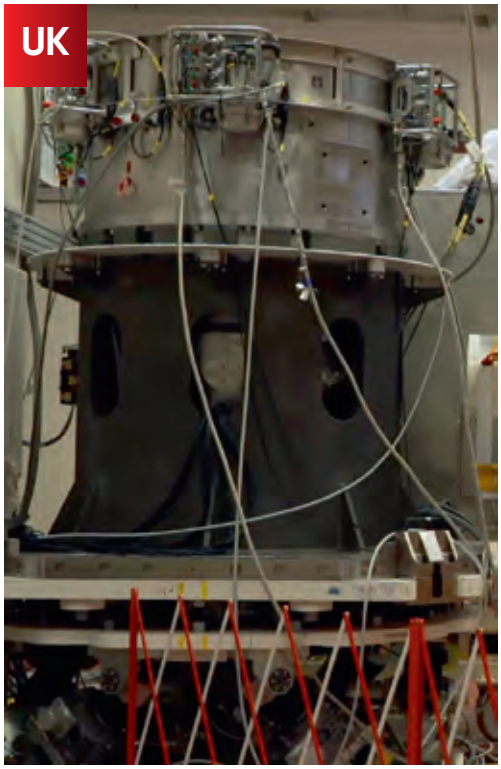
1. **elles doivent remplir leur fonction de sûreté, c'est-à-dire qu'elles doivent supporter le souffle et les éclats générés par l'explosif (situé autour de l'objet expérimental) tout en restant étanches ;**
2. **elles doivent permettre d'obtenir les mesures expérimentales requises dans l'expérience ;**
3. **elles doivent répondre à des contraintes de dimensions et de poids, qui respectent les exigences opérationnelles de l'installation.**

La conception d'une cuve de confinement n'est pas un domaine de recherche nouveau pour le CEA/DAM ni pour le MOD. Toutefois, ce type de dispositif doit être adapté constamment aux dernières exigences de sûreté. Ainsi, la France et le Royaume-Uni ont dû faire évoluer de façon importante les concepts de cuves utilisés jusqu'alors pour que leur mise en œuvre au sein d'EPURE soit possible. Chaque nation dispose ainsi d'un dispositif de confinement qualifié et opérationnel dans EPURE.

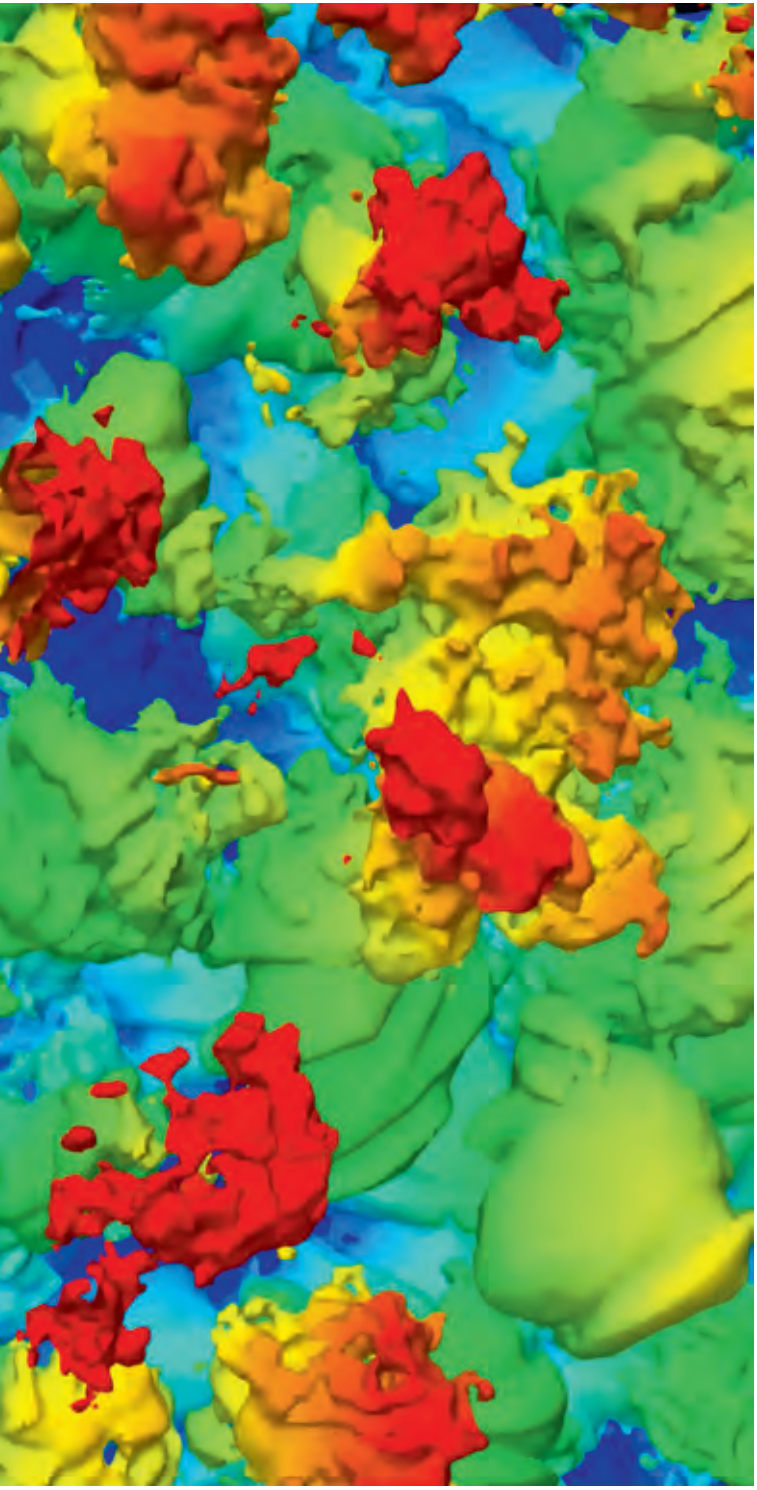
La France et le Royaume-Uni poursuivent, pour leurs besoins propres,le développement de nouveaux dispositifs de confinement qui permettront d'utiliser la pleine capacité de l'installation EPURE avec trois axes radiographiques.

Dispositifs de confinement des expériences hydrodynamiques FR et UK utilisés sur EPURE.

© CEA/DAM



© Ministry of Defence



3

La réalisation des expériences sur EPURE

Simulation numérique d'instabilités intervenant dans le fonctionnement des armes nucléaires.

© CEA/DAM

UNE EXPLOITATION FRANCO-BRITANNIQUE DE L'INSTALLATION

Depuis 2014, l'installation EPURE dispose d'une organisation entièrement binationale. **En effet, toutes les fonctions transverses partageables sont gérées par des équipes mixtes franco-britanniques.** Il s'agit des activités associés au fonctionnement de la machine du premier axe radiographique en service depuis 2014, celles concernant le suivi des actions de maintenance de l'ensemble des moyens communs d'infrastructure globale ou plus spécifiques, ainsi que la gestion globale de l'installation depuis le poste de commande et de contrôle du bâtiment gréé avec des personnels français et britanniques. Les messages importants communiqués au travers du système de transmission d'ordre depuis le poste de contrôle du bâtiment, sont systématiquement émis dans les deux langues afin d'assurer une bonne prise en compte des informations.

Les parties administratives concernant la planification, le secrétariat (sur un réseau partagé dédié) ainsi que la réalisation de la radioprotection sont également assurées par des personnels français et britanniques. Les locaux abritant les informations non partageables, qu'il s'agisse des locaux d'assemblage des expériences, des zones d'acquisitions des informations sensibles issues des expériences ou encore certains bureaux, ont un accès limité national identifié par des pictogrammes « Zone réservée ». Le chef d'installation, représentant l'exploitant nucléaire CEA, a la possibilité de conduire des visites de sécurité dans l'ensemble des locaux, y compris ceux réservés aux Britanniques après accord et, accompagné du UK Senior manager (représentant de l'opérateur technique britannique dans l'installation).

En complément, une équipe dédiée par nation assure les activités non partageables concernant essentiellement les fonctions de préparation des objets expérimentaux jusqu'à leur mise à poste dans le hall d'expérience et l'acquisition des données issues de l'expérience.

La réalisation des expériences nécessite la mise en œuvre de dispositifs partagés en plus de la machine de production de rayonnement X du premier axe radiographique.

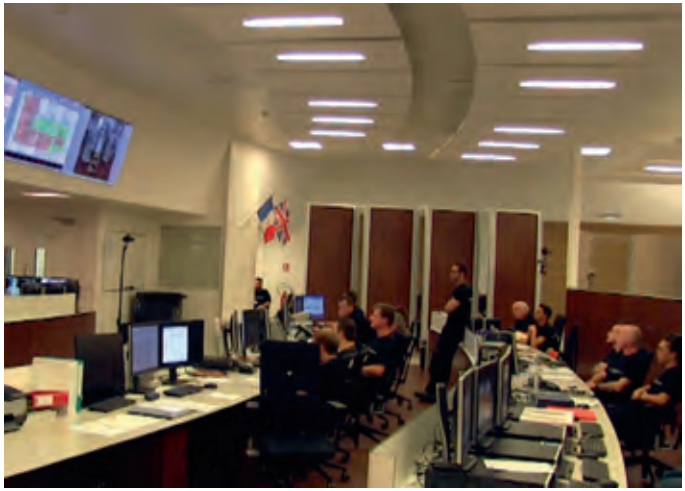
LE DÉROULEMENT D'UNE EXPÉRIENCE À UN AXE RADIOGRAPHIQUE

Les expériences sont réalisées dans des enceintes de confinement étanches. Ces enceintes sont vérifiées à leur arrivée dans l'installation dans un hall où Français et Britanniques opèrent sur leurs dispositifs respectifs. Ces enceintes sont ensuite introduites dans les zones réservées dans lesquelles les objets expérimentaux sont assemblés et positionnés dans le dispositif de confinement concerné.

Durant ces phases, les équipes mixtes préparent et qualifient le faisceau de la machine radiographique. Ils consolident la stabilité du point de fonctionnement choisi et caractérisent la source de rayonnement obtenue. La préparation du premier axe de radiographie de l'installation EPURE pour une expérience hydrodynamique est un processus qui s'étale sur plusieurs semaines. Le temps de pose attendu (60 milliardièmes de seconde), l'instant précis du flash (à 3 milliardièmes de seconde près), l'énergie très élevée des rayons X produits (jusqu'à 20 MeV) sont des contraintes très fortes qui requièrent un très haut niveau de préparation de l'accélérateur.

Les techniciens et ingénieurs français et britanniques exploitent quotidiennement l'accélérateur de particules au sein d'une même équipe équipe commune. La mixité assure un partage optimal des enjeux liés à l'exploitation d'une telle machine et à la préparation d'une expérience. L'équipe franco-britannique dispose de compétences vastes et pointues dans des domaines variés tels que les hautes puissances pulsées, la physique des accélérateurs, les technologies du vide et des servitudes fluides, l'alignement, le contrôle commande, l'électronique de numérisation et de synchronisation.

Equipe d'exploitation conjointe franco-britannique dans le poste de conduite d'expérience de l'installation EPURE.
© CEA/DAM



LES FUTURES EXPÉRIENCES À TROIS AXES RADIOGRAPHIQUES

Une fois la machine radiographique opérationnelle et le faisceau de rayons X totalement caractérisé, l'édifice expérimental dans son dispositif de confinement est alors transféré du hall de montage édifice vers le point d'expérience, devant la source radiographique, au moyen d'équipements spécifiques. Plusieurs semaines sont nécessaires pour effectuer le raccordement du dispositif de confinement au point d'expérience, son alignement, celui des détecteurs sur le faisceau et la validation de toute la séquence de réalisation de l'expérience, notamment la partie chronométrique de chaque diagnostic lié à l'édifice positionné dans le dispositif de confinement. **Pendant tout ce cycle, l'exploitation de la machine radiographique est assurée par l'équipe mixte, chaque équipe nationale assurant la préparation et la gestion des données expérimentales.** Une fois l'expérience réalisée, l'équipe nationale sauvegarde les données et les transmet au maître d'œuvre de l'expérience pour exploitation. Le dispositif de confinement est dépressurisé puis transféré en entreposage. Un nouveau cycle d'expériences peut alors débuter.

L'installation EPURE, qui se composera de trois axes radiographiques à partir de fin 2022, permettra d'étendre largement ses capacités expérimentales en autorisant des expériences avec trois angles de vue et des possibilités variées d'observation temporelle, privilégiant, au gré des demandes, soit l'observation détaillée d'un instant particulier, soit l'observation sur la durée des phénomènes attendus.

Toutes ces possibilités seront exploitées au mieux en tenant compte des effets induits par la complexité d'une configuration expérimentale multi-axes et multi-temps, effets des perturbations croisées du rayonnement diffusé et du fonctionnement électrique des axes les uns sur les autres.

L'enjeu sera aussi d'optimiser la conception et l'ordonnancement des expériences et les opérations de conditionnement des trois axes.

©JPM Partner • jpm-partner.com • 11/2020 – Crédits photos : Istock