

# CHOCS focus #09



ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES À LA DIRECTION DES APPLICATIONS MILITAIRES



## Epure Une installation scientifique pour la dissuasion nucléaire

WWW-DAM.CEA.FR

OCTOBRE 2025



## **COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES**

### **Directeur de la publication**

Olivier Vacus

### **Pilotes scientifiques**

Christophe Vermare, Virgile Guyot,  
Olivier Durand

### **Comité scientifique**

Nicolas Authier, Denis Autissier,  
Christelle Barthet, Philippe Belleville,  
Nathalie Blanchot, Daniel Bouche,  
Gilles Bourgès, Christopher Bowen,  
Danièle Cardona-Barrau, Xavier Carlotti,  
Patrick Carribault, Cyrille De Saint Jean,  
Hélène Hébert, Jean-Christophe Joly,  
Pierre-Henri Maire, Jean-Luc Miquel,  
Éric Royer, Christophe Thiébaud,  
Stéphanie Thiébaud, Laurent Videau

### **Rédacteur en chef**

Jean-Marc Laborie

### **Création, réalisation et impression**

EFIL / [www.efil.fr](http://www.efil.fr)

### **Conformité**

Régine Regnault

### **Diffusion et abonnement**

Régis Vizet

### **PHOTO DE COUVERTURE**

Vue rapprochée de cellules à induction de l'accélérateur linéaire du troisième axe radiographique de l'installation Epure. Les câbles à haute tension (en rouge) propagent les impulsions électriques provenant du hall des générateurs jusqu'aux pots d'impédance (en blanc) assemblés sur les cellules à induction (acier inoxydable). Les châssis inférieurs (gris et bleu) permettent l'alignement précis des cellules.

© CEA - DAM



Consulter la  
version digitale sur  
[www-dam.cea.fr](http://www-dam.cea.fr)

### **FOCUS**

CEA/DAM

Institut supérieur des études nucléaires  
de défense (ISENDé)  
Bruyères-le-Châtel,  
F-91297 Arpajon Cedex  
Tél.: 33 (0)1 69 26 76 98

Email: [chocs@cea.fr](mailto:chocs@cea.fr)

Brochure imprimée sur papier écogéré

ISSN 1961-7399

Dépôt légal à parution

*La reproduction totale ou partielle des informations et illustrations contenues dans ce numéro doit être soumise à l'accord préalable du CEA. Le courrier des lecteurs sera transmis aux auteurs par le secrétariat de la revue.*

# Sommaire

AVANT-PROPOS

P. 02

## LE MOYEN EPURE

- 1a** — **Qu'est-ce qu'une expérience hydrodynamique ?** P. 04  
*O. Durand, C. Matignon*
- 1b** — **Description de l'installation** P. 06  
*J. Beaubernard*
- 1c** — **Conduite d'une expérience** P. 09  
*G. Allart, Y. Pierre, M. D'aloisio, V. Pouliquen, T. Demazeau*
- 1d** — **Les moyens de confinement et leur cycle de vie** P. 16  
*R. Parouty, T. Sun, N. Bourdon*

## LA RADIOGRAPHIE ÉCLAIR

- 2a** — **Description d'une chaîne de radiographie** P. 23  
*V. Brandon, F. Ballanger*
- 2b** — **Installation multiaxe** P. 26  
*A. Friou*
- 2c** — **Source de rayonnement X** P. 28  
*V. Brandon*
- 2d** — **Les détecteurs** P. 31  
*M. Wansek*

## LES MACHINES DE HAUTES PUISSANCES PULSÉES

- 3a** — **Des électrons pour des photons** P. 33  
*C. Vermare, R. Maissonny*
- 3b** — **Les accélérateurs linéaires à induction** P. 35  
*B. Cassany, P. Soutenain*
- 3c** — **Caractérisation du faisceau électronique** P. 40  
*B. Cadilhon, B. Cassany, C. Fourment, C. Vermare*
- 3d** — **Système anti-débris** P. 43  
*C. Vermare*

# Avant-propos

## Le programme Simulation et Epure

Une réussite exceptionnelle à plus d'un titre \_\_\_\_\_



C'est difficile? Alors, il faut chercher. C'est votre métier de chercher et vous en avez la compétence. Nous disposons d'assez de savants, d'assez de chercheurs, d'assez d'ingénieurs, d'assez d'imagination et de courage.» C'est par ces mots que, le 5 mai 1994, le président de la République mettait le CEA-DAM au défi de concevoir et garantir à long terme les armes nucléaires de la France sans essais nucléaires nouveaux. La perspective d'un arrêt définitif des essais nucléaires marquait ainsi le début de la formidable aventure du programme Simulation.

Et il en a fallu des « *savants* » pour développer les modèles physiques capables de reproduire le fonctionnement des armes. Il en a fallu des « *chercheurs* » pour traduire ces modèles en algorithmes et pour les résoudre sur des supercalculateurs. Et il en a fallu des « *ingénieurs* » pour développer des instruments expérimentaux hors du commun, capables de valider les simulations numériques.

Car contrairement à ce que d'aucuns pourraient croire, le développement de la simulation ne signifie pas la victoire du virtuel sur le réel. Bien au contraire ! Le programme Simulation est solidement ancré sur ses trois piliers : la modélisation physique, la simulation numérique et la validation expérimentale dont Epure est un instrument emblématique au même titre que le Laser Mégajoule. Ces instruments sont indispensables à la garantie de sûreté et de fiabilité des têtes nucléaires dans le temps.

Une arme nucléaire est un formidable amplificateur d'énergie qui permet en une fraction de seconde de multiplier l'énergie électrique de l'initiateur par un million de milliards (de 1 J à  $10^{15}$  J en moins de 100  $\mu$ s). Pour produire une telle amplification, la première phase consiste à mettre la matière nucléaire dans des conditions propices au déclenchement d'une réaction en chaîne, à l'aide d'un explosif chimique. En l'absence d'essais nucléaires, la maîtrise de cette phase, cruciale pour le fonctionnement, passe par la réalisation d'expériences au sein d'installations radiographiques comme Epure, mettant en œuvre des explosifs et des matériaux identiques ou proches de ceux des armes, mais dimensionnés pour ne pas atteindre le seuil de déclenchement des réactions nucléaires.

Héritière d'une longue lignée de moyens de radiographie, engagée par les pionniers au fort de Vaujours et poursuivie au polygone d'expérimentation de Moronvilliers, l'installation Epure est bien plus qu'un simple générateur de rayons X. C'est un système expérimental complexe qui combine plusieurs axes de radiographie, des détecteurs et diagnostics, un ensemble expérimental associant pyrotechnie et nucléaire, une synchronisation et une infrastructure de soutien permettant la réalisation d'expériences ultra-précises dans des conditions de sécurité et de sûreté maximales. Qui plus est, pour ajouter à la complexité technique une complexité organisationnelle, cette installation est développée et exploitée en coopération internationale avec nos partenaires britanniques (voir **ENCADRÉ**) dans le cadre du traité Teutatès. Et pourtant, les équipes ont su faire preuve « *d'assez d'imagination et de courage* » pour réussir dans cette installation des essais uniques au monde.

Plus précisément, 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. Concrètement, elles sont conçues pour

**ENCADRÉ****Le traité Teutatès**

Le traité Teutatès 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 dans 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. Teutatès permet de maintenir les capacités de dissuasion nucléaire de nos deux pays en structurant une coopération technique et technologique autour d'installations qui contribuent aux programmes de renouvellement des armes de chaque nation.

Cette coopération est en totale conformité avec les exigences du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires qui interdit les explosions expérimentales d'armes nucléaires ainsi que toute autre explosion nucléaire. Tout en tenant compte de leurs obligations vis-à-vis de ce traité, nos deux pays avaient besoin de développer des installations et de mettre en œuvre des expériences 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 d'installations nationales, pourraient satisfaire aux attentes avec un coût total moindre. C'est pour cette raison que les gouvernements français et britannique ont décidé de coopérer dans le cadre du programme Teutatès. 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 Teutatès 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). La France et le Royaume-Uni exploitent une seule et même installation. 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.

caractériser avec la plus grande précision l'état et le comportement des matières nucléaires, notamment le plutonium, dans les conditions rencontrées juste avant la phase nucléaire de fonctionnement des armes. 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 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 qui résiste à l'explosion. Les images du processus d'implosion sont réalisées par de puissantes machines radiographiques éclair d'un très haut niveau de performance.

Les concepteurs d'armes disposent d'un outil incomparable pour adapter et garantir les charges nucléaires. Cet outil permet de répondre ainsi aux demandes des plus hautes autorités françaises pour maintenir la crédibilité de notre dissuasion face à l'évolution des défenses et du contexte international.

**Denis Vacek**

Directeur du programme Simulation au CEA-DAM

# Qu'est-ce qu'une expérience hydrodynamique ?

1a

L'installation Epure est un moyen scientifique et technique au meilleur niveau mondial et elle constitue un élément de la chaîne complexe du programme Simulation du CEA - DAM. Il contribue, depuis l'arrêt des essais nucléaires français, à la souveraineté de la France en matière de nucléaire de défense, en totale conformité avec les exigences du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires.

**L**e Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Tice), ratifié en 1998 par le Royaume-Uni et la France, interdit les explosions expérimentales d'armes nucléaires, ainsi que toute autre expérience nucléaire. Pour préserver leurs capacités de dissuasion nucléaire et garantir la fiabilité et la sûreté de leurs armes sans avoir recours à un essai, les deux pays ont décidé, dans le cadre du programme conjoint Teutatès, d'unir leurs efforts pour coopérer en matière de nucléaire de défense en construisant et en exploitant une installation commune, Epure, située en Bourgogne sur le site de Valduc du CEA - DAM. Celle-ci permet aux deux nations de maintenir leur capacité de dissuasion nucléaire et de réaliser d'importantes économies (partage des coûts d'exploitation et de démantèlement). Elle donne aussi l'occasion à leurs communautés scientifiques respectives de s'enrichir mutuellement.

Les expériences menées sur Epure sont conçues pour caractériser avec la plus grande précision l'état et le comportement des matières nucléaires, dont le plutonium, dans les conditions thermodynamiques extrêmes rencontrées durant la phase de compression du matériau fissile. Elles sont nécessaires aux concepteurs d'armes et aux théoriciens pour éprouver la validité et la pertinence des simulations numériques et des modèles physiques qu'ils développent, et pour démontrer ainsi qu'ils maîtrisent toute la physique mise en jeu et sa complexité. En pratique, des explosifs conventionnels à fort pouvoir propulsif sont utilisés pour comprimer la matière, qui se comporte alors comme un fluide (comportement dit hydrodynamique).

Les ingénieurs et chercheurs peuvent réaliser deux types d'expériences :

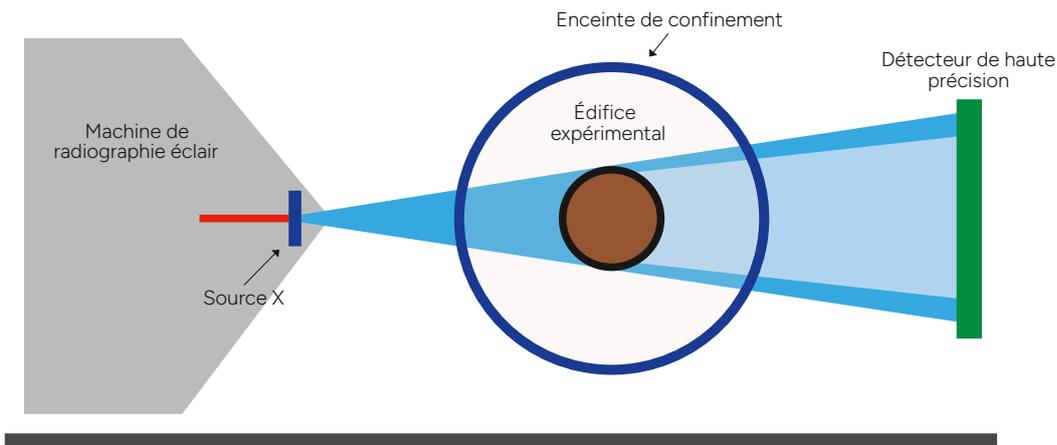
- des expériences d'hydrodynamique à échelle 1 d'objets inertes. Dans ce cas, le plutonium est remplacé par une matière non nucléaire, dont la densité et la masse sont similaires ;
- des expériences d'hydrodynamique à échelle réduite. On utilise alors le plutonium, mais en quantité trop faible pour provoquer un dégagement d'énergie nucléaire par fission.

Ces expériences sont réalisées en toute sécurité en employant une enceinte de confinement étanche, nommée dispositif de confinement, qui permet d'assurer la sécurité du personnel exploitant pendant la préparation de l'expérience, de contenir l'explosion au moment de l'expérience et les produits chimiques issus de la détonation de l'explosif, ainsi que les matériaux testés après l'expérience.

Le comportement hydrodynamique de la matière peut être étudié, soit de manière non intrusive en utilisant des moyens radiographiques, soit de manière intrusive en utilisant des diagnostics de mesure optiques ou électriques que l'on insère dans l'objet étudié ; on parle dans ce second cas d'expériences optoélectroniques. Dans les expériences radiographiques, on cherche principalement à détecter des interfaces entre des matériaux de différentes densités et à obtenir des cartes de densité par reconstruction tomographique.

Les expériences optoélectroniques consistent principalement à mesurer des vitesses très élevées (plusieurs milliers de mètres par seconde), des positions, et à effectuer des pesées d'éjectas. Générée par la détonation de l'explosif, l'onde de choc qui comprime le matériau

FIGURE 1



→ Schéma simplifié d'un axe de mesure radiographique mettant en œuvre une source de rayons X, un édifice à observer et un détecteur.

fissile en le traversant porte ce dernier à des pressions de plusieurs dizaines de gigapascals, c'est-à-dire à quelques millions de fois la pression atmosphérique, tandis que la température croît de plusieurs centaines de kelvins. Des changements de phase peuvent se produire, mais sans aller jusqu'à la formation de plasmas. Les processus physiques mis en jeu sont essentiellement transitoires, la matière ne restant soumise à une haute pression que pendant une durée très brève qui se mesure en millièmes de seconde (microsecondes). Les études théoriques et expérimentales relatives aux ondes de choc et à leurs effets appartiennent au domaine dit des hautes pressions dynamiques, et les techniques de mesure associées (radiographiques et optoélectroniques) doivent être adaptées à ces caractéristiques physiques.

Dans les expériences radiographiques, on réalise des photographies instantanées de la matière en implosion, elles sont obtenues avec des machines très performantes et très puissantes. Dans la suite, nous nous focaliserons sur ces machines radiographiques, qui constituent une des spécificités de l'installation Epure.

De manière générale, une chaîne de radiographie est constituée d'une source de rayonnement X et d'un détecteur calibré, capable de distinguer les variations d'intensité des flux de photons ayant interagi avec l'objet, dans le but de visualiser les formes internes de l'objet avec une très haute résolution. L'objet est placé entre la source et le détecteur et, pour le cas particulier des expériences réalisées à Epure, c'est l'ensemble complet constitué d'une enceinte de confinement et de l'édifice expérimental en son sein qui est positionné très précisément entre la source et le détecteur (FIGURE 1).

Le rayonnement lumineux émis par les machines radiographiques doit avoir une durée brève, inférieure à la microseconde, pour radiographier l'objet en cours d'implosion dans un état « figé » et éviter ainsi le flou de bougé sur les images. On parle de

radiographie éclair: la durée typique des impulsions lumineuses est de l'ordre de la centaine de nanosecondes (milliardièmes de seconde). Par ailleurs, ce rayonnement lumineux doit être très pénétrant et capable de traverser non seulement l'objet pendant sa phase de compression, c'est-à-dire lorsque la densité de matière devient très élevée et atteint plusieurs dizaines de grammes par centimètre cube, mais également l'enceinte de confinement l'enveloppant, cette dernière étant constituée de matériaux lourds comme l'acier inoxydable. Les machines sont donc très énergétiques et émettent des photons X d'une énergie jusqu'à 20 MeV. Le rapport signal à bruit impose un grand nombre de photons, exprimé par de fortes doses (supérieures à quelques grays). Par ailleurs, la dimension de la source X doit être réduite pour favoriser la précision d'observation: celle-ci est de quelques millimètres. De tels moyens expérimentaux sont très rares à l'échelle mondiale et ne se rencontrent que dans les laboratoires étatiques travaillant également dans le nucléaire de défense (en particulier aux États-Unis, en Chine et en Russie).

Depuis la fin 2023, deux axes de radiographie éclair sont en service dans l'installation Epure, chacun étant constitué d'une machine complexe et puissante, dont les performances la situent au meilleur niveau mondial. Un troisième axe est en cours de mise en service. À l'heure actuelle, chaque axe peut produire un flash X de manière indépendante. À terme, on pourra donc caractériser l'objet en cours d'implosion au même instant sur les trois axes pour imager par exemple d'éventuelles singularités tridimensionnelles au cours de l'implosion, ou bien à des instants différents (un temps par axe) pour réaliser un suivi temporel de l'hydrodynamique de l'implosion. L'évolution future des machines radiographiques permettra d'acquérir plusieurs images au cours du temps sur chaque axe, la source devant alors être capable d'émettre successivement plusieurs flashes lumineux très brefs.

J. Beaubernard CEA - DAM, centre de Valduc

# Description de l'installation

# 1b

L'installation Epure est un système complet qui permet de gérer toutes les étapes d'une expérimentation, depuis l'assemblage des objets à étudier jusqu'à la gestion des déchets. Nous détaillons ici le rôle et les phases de montée en puissance de chaque bâtiment ainsi que l'organisation mise en place.

Implanté dans le centre de Valduc, le bâtiment principal de l'installation Epure s'étend sur 40 000 m<sup>2</sup>. La **FIGURE 1** est une vue aérienne de cette installation.

Le CEA-DAM réalise depuis des décennies des expériences hydrodynamiques mettant en œuvre la radiographie éclair. Avant Epure, il était uniquement possible d'étudier des matériaux non nucléaires, dont les caractéristiques hydrodynamiques sont proches de celles de nos matériaux d'intérêt, mais qui induisaient une incertitude liée à la transposition du comportement thermomécanique de ces matériaux de simulation à celui

des matériaux nucléaires d'intérêt. L'apport majeur de l'installation Epure est d'éliminer cette incertitude liée à la nature des matériaux.

## La construction de l'installation

L'installation s'est construite en plusieurs phases, dans un calendrier contraint, imposé par les jalons de renouvellement de nos armes nucléaires: la réalisation des premières expériences à Epure était nécessaire pour parvenir à garantir la fiabilité et la sûreté d'un système d'arme nucléaire.

FIGURE 1



→ Vue aérienne de l'installation Epure.

Le programme a été lancé en 2008 et la configuration initiale de l'installation Epure, qui devait permettre la réalisation des expériences françaises avec un premier axe radiographique, a été mise en service en 2014. Cette configuration comportait essentiellement :

- une zone d'entreposage des matières pyrotechniques françaises;
- un hall de préparation des dispositifs de confinement;
- un hall d'assemblage et d'intégration français;
- un hall d'expérimentation placé sur un axe radiographique;
- un bâtiment dédié à la maintenance des équipements constituant ce premier axe radiographique.

Cette configuration a été exploitée jusqu'en 2020 et a permis la réalisation des expériences françaises.

À partir de 2014, une nouvelle phase de travaux a été conduite pour que les équipes britanniques puissent disposer des locaux nécessaires à la réalisation d'expériences avec un axe radiographique. Il a ainsi été construit :

- une extension au bâtiment d'entreposage des matières explosives, dédiée aux matières britanniques;
- un hall d'assemblage et d'intégration britannique.

La mise en service de cette extension de l'installation a été réalisée en 2019.

La phase 2 de construction de l'installation a été conduite entre 2017 et 2023 avec la réalisation de deux nouveaux bâtiments (nommés blocs) accueillant chacun un nouvel axe radiographique (axe 2 et axe 3). Ces blocs sont adjacents au hall d'expériences qui a été modifié entre janvier 2021 et juillet 2022 pour permettre l'intégration des parties terminales des deux nouveaux axes. Ainsi ont été réalisés :

- l'aménagement des espaces hébergeant des équipements des machines (dont équipements de contrôle et servitudes) et leurs diagnostics associés (capteurs dosimétriques et imageurs des faisceaux de photons X);
- la modification de systèmes transverses à l'installation (ventilation nucléaire, systèmes de sécurité et de protection des personnes et des biens, système de synchronisation expérimentale, réseaux de communication sécurisés, système de référencement géométrique interne, moyens de manutention lourds).

Une extension au bâtiment de maintien en conditions opérationnelles des machines radiographiques a par ailleurs été construite pour tenir compte des moyens spécifiques aux différents axes.

À ce jour, l'axe radiographique n° 2 est en phase de mise en service : les premiers rayons X ont été créés en novembre 2024. L'axe radiographique n° 3 a été mis en service en novembre 2022. La première expérience permettant d'obtenir deux images a

FIGURE 2



→ Représentation 3D du hall d'expérience avec identification de l'extrémité des trois sources de rayons X, les détecteurs associés et le dispositif de confinement.

été conduite en décembre 2023 (axe 1 et axe 3), et la première expérience à pleine capacité (trois axes) est attendue pour décembre 2025. La FIGURE 2 montre, dans une représentation 3D, la disposition du hall d'expérience lors de la réalisation d'une expérience.

L'enjeu est d'obtenir, avec les trois axes, le rythme expérimental constaté avec un seul axe. Cela impliquera d'optimiser la conception et l'ordonnement des expériences ainsi que les opérations de préparation des trois axes. Pour cela, il est nécessaire d'étendre les plages de fonctionnement afin de minimiser l'impact des activités de maintien en conditions opérationnelles pendant la durée d'exploitation nominale des machines radiographiques. Le travail est donc réparti entre deux équipes, une première en heures ouvrées et une deuxième en heures non ouvrées, pour couvrir une amplitude horaire de 8 h 00 à minuit.

### L'organisation de l'unité Epure

L'unité Epure a été créée pour exploiter l'installation et pour réaliser les essais de chaque nation. Depuis 2014, l'installation dispose d'une organisation entièrement binationale. Toutes les fonctions transverses partageables sont gérées par des équipes mixtes franco-britanniques. Il s'agit en particulier des activités associées à l'exploitation des machines radiographiques et au suivi des actions de maintenance de l'ensemble des moyens communs d'infrastructure globale ou plus spécifiques (ventilation, courants forts et faibles, équipements de manutention-levage, machines radiographiques).

Les parties administratives concernant la planification, le secrétariat (sur réseau partagé dédié) ainsi que la réalisation de la radioprotection sont également assurées par des personnels français et britanniques.

En complément, une équipe dédiée par nation assure les activités non partageables. Cela concerne essentiellement les fonctions de préparation des objets expérimentaux, de conduite des expériences et d'acquisition-enregistrement des données sensibles qui en sont issues.

### **Les principes d'exploitation de l'installation**

Le bâtiment doit permettre d'exploiter des matières pyrotechniques, des matières nucléaires et des informations classifiées (secrètes ou très secrètes), françaises ou britanniques.

Pour les matières pyrotechniques, une enceinte pyrotechnique est définie. C'est une première source de

contraintes d'exploitation, dans un cadre réglementaire qui impose son propre référentiel (six dossiers d'étude de sécurité du travail pyrotechnique ayant reçu l'avis favorable de l'inspecteur des poudres et explosifs, puis approuvés par le directeur du CEA-DAM, ainsi qu'un dossier de transport pyrotechnique).

Pour la gestion des matières nucléaires, il s'agit également d'une installation individuelle, au sein de laquelle se trouve une zone délimitée au sens radiologique. Cela implique d'autres règles d'exploitation, c'est un second cadre réglementaire qui impose son propre référentiel (trois rapports provisoires de sûreté validés par l'Autorité de sûreté nucléaire de défense ainsi que des règles générales d'exploitation).

Concernant les informations classifiées de chaque pays, l'installation doit abriter des locaux spécifiques à chaque nation pour les informations non partageables (locaux d'assemblage des expériences, zones d'acquisition des informations sensibles issues des expériences ou encore certains bureaux).

G. Allart, Y. Pierre, M. D'aloisio, V. Pouliquen, T. Demazeau CEA - DAM, centre de Valduc

# Conduite d'une expérience



Une expérience à Epure est l'aboutissement d'une succession d'opérations réalisées au sein de l'installation pendant plusieurs semaines. Le séquençage et l'organisation doivent être parfaitement maîtrisés pour obtenir des résultats de qualité, nécessaires à la garantie de la sûreté et de la fiabilité de nos armes.

## Le montage

Les expérimentations françaises sont assemblées dans le hall d'assemblage et d'intégration français, noté HAI FR. Les activités qui y sont engagées comprennent :

- le montage de l'édifice expérimental ;
- le réglage des six collimateurs graduels qui équipent l'anneau de collimation (voir l'ARTICLE 2a p. 24) ;
- l'intégration de l'édifice dans la cuve ;
- les tests d'étanchéité du dispositif de confinement (DCo) (voir l'ARTICLE 1a p. 4).

L'équipe d'assemblage est constituée de deux opérateurs nominaux, un opérateur secours et un responsable chargé d'opérations. Les opérateurs exécutent les opérations lues par ce dernier et décrites dans les listes d'opérations constituant la tâche 1 du séquentiel expérimental. À ce titre, afin

de répondre aux exigences de sûreté et de sécurité de l'installation, chaque opérateur suit une qualification dédiée à chaque édifice expérimental (voir ENCADRÉ 1).

Des outillages qualifiés d'autosûrs sont utilisés au cours des différentes phases du montage pour permettre ainsi d'atteindre un facteur de risque équivalent à  $10^{-5}$ , soit la survenue potentielle d'une défaillance sur cent mille opérations.

Le montage de l'édifice se déroule sur un bâti d'assemblage ancré sur le marbre d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) à portique (FIGURE 1). La stabilité de la machine repose sur les 16 tonnes de granit qui constituent le marbre, d'une longueur de 4 m, d'une largeur de 2 m et de hauteur sous portique de 1,8 m. L'incertitude relative au montage de l'édifice est déterminée à quelques microns. Une vérification de la MMT est

### ENCADRÉ 1

#### Des monteurs qualifiés pour toute nouvelle expérience

En préalable à chaque montage expérimental, chaque nouvelle définition d'édifice nécessite une formation de l'équipe d'assemblage dispensée par une unité responsable de la maîtrise d'œuvre. Cette formation se déroule dans un hall de maquettage. Au cours de cette formation qui constitue également un premier maquettage, les monteurs sont formés sur les nouveaux outillages, les listes d'opérations ainsi que sur l'ensemble des programmes de mesure dimensionnelle élaborés sur une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). Un échange d'informations et d'expertises entre les deux unités amène à l'évolution des listes d'opérations et des programmes de mesures contribuant ainsi à l'amélioration du processus de montage.

À l'issue de cette formation, l'équipe de montage est qualifiée apte au montage de l'édifice expérimental.

Un second maquettage est ensuite réalisé au sein du local de montage nominal du hall d'assemblage et d'intégration français (HAI FR). Cette deuxième séquence de maquettage permet de valider le bon déroulement des programmes de mesure dimensionnelle sur la MMT du HAI FR, ainsi que la réalisation d'un maquettage dans l'environnement de travail Epure et d'affiner les listes d'opérations pour prendre en compte l'environnement du local et de ses servitudes. Lorsque cette étape est franchie, les opérateurs sont autorisés par le chef d'installation à réaliser l'assemblage de l'édifice expérimental.

FIGURE 1



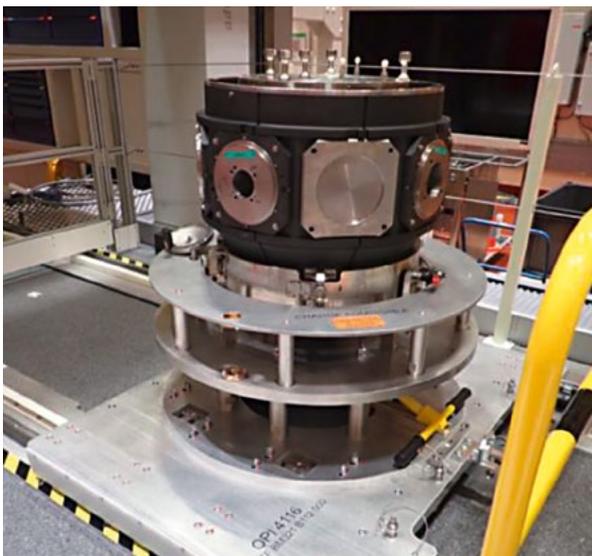
—> Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) du hall d'assemblage et d'intégration français équipée des deux postes d'assemblage.

réalisée annuellement et un contrôle systématique avant chacun des montages est pratiqué par l'exploitant Epure.

Une fois l'édifice assemblé, il est transféré vers le deuxième poste d'assemblage ancré sur le marbre de la MMT et intégré dans l'anneau de collimation (FIGURE 2) équipé de six collimateurs (deux collimateurs situés de part et d'autre de l'objet à radiographier, en amont et en aval, pour chacun des trois axes radiographiques). Les collimateurs sont alignés à 30  $\mu\text{m}$  près par rapport au centre de l'objet.

Depuis la mesure dimensionnelle des éléments géométriques définissant le référentiel de l'édifice jusqu'à l'alignement du DCo sur le référentiel

FIGURE 2



—> Anneau portant les collimateurs des trois axes sur le marbre de la MMT.

expérimental aux nez des machines radiographiques, une série de transferts de référentiel est appliquée pour ainsi maintenir la connaissance de la position relative du centre de l'édifice au cours des différentes étapes d'assemblage et d'intégration.

### Mise en place des diagnostics – Mesures optoélectroniques et mécaniques

Les mesures optoélectroniques permettent d'observer les ondes de détonation et les ondes de choc. Les mesures mécaniques servent à vérifier l'intégrité du dispositif de confinement expérimental.

#### Mesures optoélectroniques

Voici quelques ordres de grandeur pour comprendre les options techniques et organisationnelles : une expérience dure environ 100  $\mu\text{s}$ , les composants de l'édifice expérimental se déplacent à quelques milliers de mètres par seconde et la précision temporelle exigée sur la mesure de la vitesse des composants en mouvement est de l'ordre de la dizaine de nanosecondes.

Deux principes sont régulièrement utilisés pour observer les ondes de détonation et de choc. Le premier principe, connu depuis les années 1970-1980, consiste à utiliser une fibre optique à l'extrémité de laquelle est fixée une chambre remplie d'air. Le capteur utilisé aujourd'hui est une fibre optique à capuchon (FOAC). Comme décrit sur la FIGURE 3, sous l'effet d'un impact à une vitesse supérieure à 1 000 m/s, l'air de la chambre s'ionise et émet un rayonnement lumineux avec un spectre qui s'étend du visible au proche infrarouge. Cette impulsion lumineuse est transmise jusqu'à une photodiode, dont le signal est enregistré sur un oscilloscope. Ces capteurs, insensibles aux perturbations électromagnétiques et d'un encombrement réduit, sont très adaptés pour instrumenter les édifices.

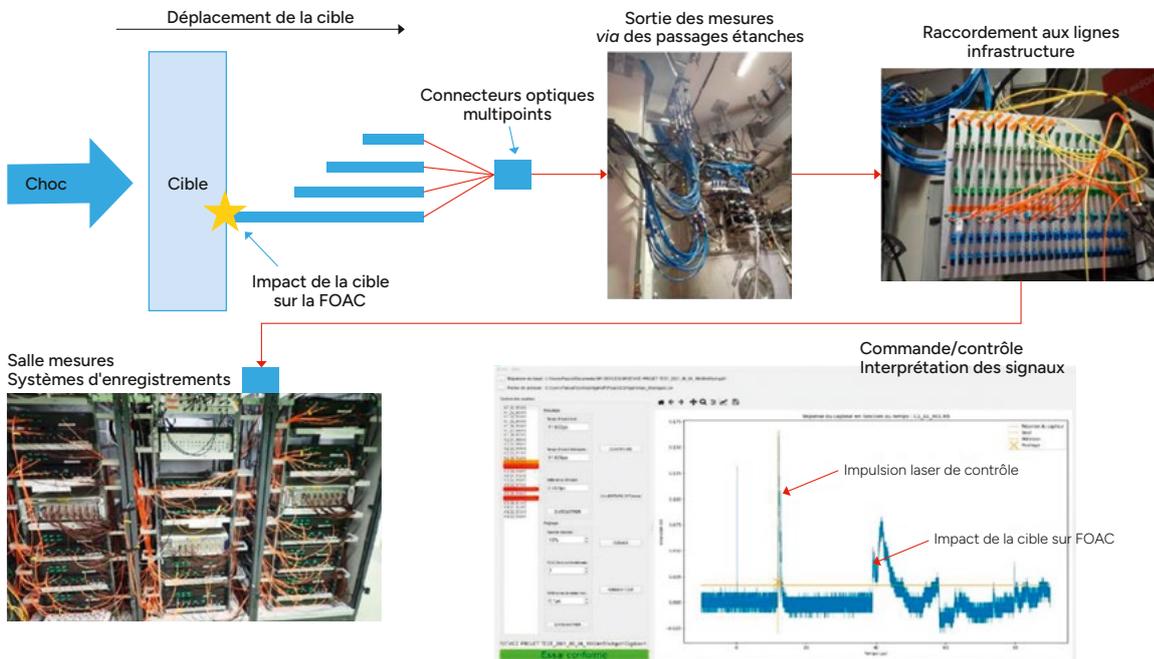
Afin de pouvoir exploiter ces capteurs, les actions suivantes ont été conduites :

- adaptation des capteurs et de la ligne d'enregistrement pour utiliser des connecteurs optiques multipoints ;
- association de sources laser impulsives à la ligne d'enregistrement, pour simuler la réponse des capteurs lors des essais précédant l'expérience ;
- développement de logiciels de commande-contrôle et d'interprétation exploitables.

Ces actions permettent de disposer d'un diagnostic intégré, autorisant la mise en œuvre de plusieurs centaines de capteurs dans un délai restreint, compatible avec les contraintes de planning dans le hall d'expériences.

Le second principe de mesure utilisé est la vélocimétrie hétérodyne, basée sur l'effet Doppler : comme décrit sur la FIGURE 4, une cible est éclairée avec un laser de fréquence fixe. Lorsque celle-ci est

FIGURE 3



→ Mesures de chronométrie par fibre optique à capuchon.

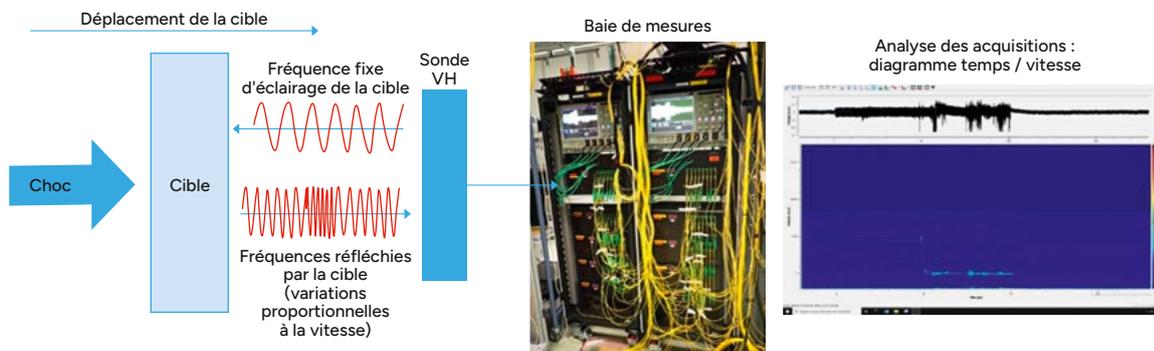
en mouvement, la lumière réfléchi par la cible subit un décalage de fréquence proportionnel à sa vitesse (décalage Doppler). En faisant interférer cette lumière de fréquence variable avec un laser de fréquence fixe, un signal de battement est obtenu. Sa fréquence varie en fonction du mouvement de la cible. L'acquisition de cette variation de fréquence par une photodiode, puis son traitement mathématique au moyen d'une transformée de Fourier glissante permettent d'obtenir la variation de la vitesse de la cible en fonction du temps.

### Mesures mécaniques

Pour mesurer les effets de la détonation sur le dispositif de confinement, noté DCo en abrégé, des centaines de mesures mécaniques sont effectuées sur ce dernier. Pour cela, les capteurs utilisés sont principalement :

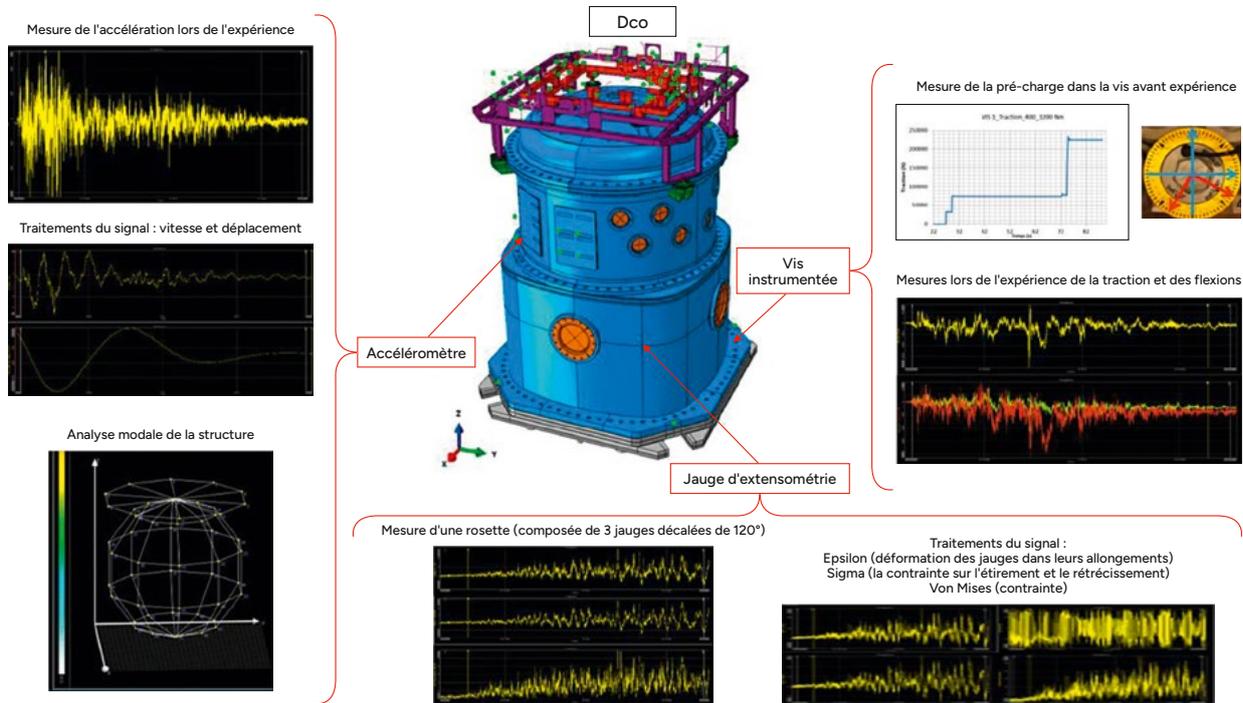
- des accéléromètres, afin de vérifier les accélérations subies par le DCo ;
- des jauges d'extensométrie afin de vérifier que l'enceinte de confinement reste dans le domaine élastique ;
- des capteurs de force sur certaines vis du dispositif de confinement.

FIGURE 4



→ Mesures de vitesse par vélocimétrie hétérodyne.

FIGURE 5



→ Mesures mécaniques déployées sur le dispositif de confinement en configuration deux axes.

La **FIGURE 5** représente les différents signaux mesurés sur un DCo en fonction des capteurs utilisés. L'objectif de ces mesures est de contrôler le comportement du DCo lors du fonctionnement de l'édifice pyrotechnique.

En conclusion, la mise en place des diagnostics à Epure nécessite de prendre en compte le champ de contraintes techniques, de sûreté et d'organisation lié à l'exploitation binationale de cette installation. Cela conduit à des adaptations des diagnostics existants, réalisées par les équipes du CEA-DAM en partenariat avec des industriels.

## Synchronisation d'une expérience à Epure

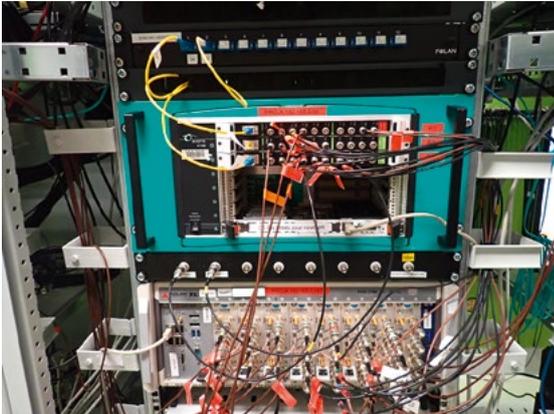
L'un des challenges lors d'une expérience à Epure est de déclencher les sources radiographiques à l'instant exact demandé par le concepteur de l'expérience. Le temps radiographique est l'écart temporel entre l'origine des temps de l'expérience et les flashes X générés par les machines radiographiques. Durant l'analyse de l'expérience hydrodynamique, la simulation et l'expérience sont comparées. Dès lors se pose la question suivante: comment garantir que les différences observées entre les images ne sont pas dues à une erreur de synchronisation entre la détonation de l'explosif et le fonctionnement des machines radiographiques ?

Pour relever ce défi, les personnes en charge de la mise de feu et de la synchronisation de l'installation Epure ont développé un système de synchronisation performant. Ce système, dont le matériel est illustré sur la **FIGURE 6**, repose sur:

- un séquenceur d'expérience générant des signaux de référence appelés DEC 0 (1 s avant flash X), DEC 1 (1 ms avant) et DEC 2 (10  $\mu$ s avant);
- un réseau de fibres optiques distribuant ces signaux de référence dans toute l'installation;
- des générateurs de retard (GDR) déclenchés par l'un des signaux optiques du séquenceur d'expérience;
- une mise de feu délivrant l'énergie aux détonateurs et générant l'origine des temps de l'expérience, appelée  $T_0$ ;
- un GDR déclenché par un signal électrique issu de la mise de feu (GDR R2 sur le schéma de la **FIGURE 7**);
- une charge équivalente permettant de déclencher la mise de feu sur des résistances instrumentées lors des répétitions. Ces résistances sont représentatives des détonateurs utilisés sur l'expérience réelle;
- des capteurs redondants sensibles aux rayons X;
- des numériseurs enregistrant les signaux produits lors de l'expérience ou de la répétition;
- un logiciel développé au CEA-DAM permettant de corriger les générateurs de retard de façon semi-automatique à chaque répétition.

La plupart des équipements utilisés dans l'installation sont partagés, c'est-à-dire qu'ils peuvent être utilisés

FIGURE 6



→ Photo de la baie de synchronisation. Les générateurs de retard se situent en haut dans le châssis bleu, les numériseurs se situent en bas dans le châssis gris.

aussi bien lors d'une expérience française que britannique. Cependant, le temps radio correspondant au temps d'observation du phénomène d'intérêt est une donnée sensible, il est classifié par la nation réalisant cette expérience. Il a été ainsi nécessaire de rendre le système de synchronisation plus complexe afin de rendre cette information temporelle privée. La FIGURE 7 en présente le fonctionnement.

Le fonctionnement standard d'une chaîne de déclenchement d'une expérience repose sur un générateur de retard (GDR) qui a pour fonction de déclencher la mise de feu (MdF) qui elle-même déclenche le fonctionnement des détonateurs

ainsi que les machines radiographiques associées. Les signaux issus des diagnostics ont alors une référence temporelle directement liée au déclenchement de cette MdF. Les temps observés sont ceux du fonctionnement même de l'édifice pyrotechnique. Afin de masquer cette valeur, un GDR a été positionné entre la MdF et le déclenchement des diagnostics afin d'induire un biais, contrôlable et connu uniquement par la nation qui réalise l'expérience. La valeur temporelle est ainsi biaisée et non représentative du temps de fonctionnement de nos édifices pyrotechniques.

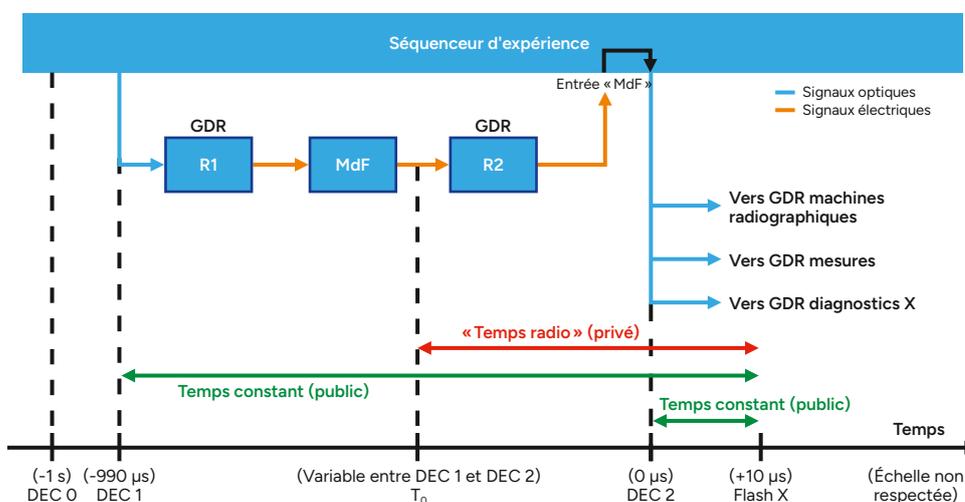
La précision temporelle du système de synchronisation est directement liée à la nature des matériaux et aux vitesses de déplacement mises en jeu. Les explosifs utilisés dans les édifices expérimentaux possèdent des vitesses de détonation de quelques kilomètres par seconde (jusqu'à plus de 9 km/s pour les plus rapides). Cela implique une durée d'expérience de quelques dizaines de microsecondes. Ces expériences sont mille fois plus brèves qu'un battement de cils.

Afin d'obtenir des images aux instants d'intérêt, les systèmes sont synchrones à une précision de l'ordre de quelques nanosecondes avec une reproductibilité inférieure à la nanoseconde.

### Garantie de fonctionnement des lignes de mesures optiques

L'installation Epure réalise des expérimentations hydrodynamiques avec des exigences élevées de précision des mesures et de fiabilité des diagnostics. Des détonations en milieu confiné sont étudiées

FIGURE 7



→ Chronogramme du système de synchronisation d'une expérience dans l'installation Epure.

avec des machines radiographiques à hautes puissances pulsées comme diagnostic principal. D'autres diagnostics, embarqués au plus près de l'expérience, sont également utilisés pour fournir des données complémentaires telles que la chronométrie d'événements très brefs (à l'aide de capteurs électriques ou optiques, actifs ou passifs) ou la mesure de vitesses (vitesse matérielle, célérité de choc ou de détonation).

Pour garantir la précision et la fiabilité de ces diagnostics, l'intégrité des chaînes d'acquisition est vérifiée tout au long des phases de préparation de l'expérience. C'est notamment le cas des capteurs optiques qui utilisent des fibres optiques pour transmettre des données aux unités d'enregistrement. Les machines radiographiques imposent des dispositions particulières concernant l'agencement des chaînes d'acquisition pour protéger les cartes électroniques du rayonnement X qu'elles émettent. Les unités d'enregistrements sont donc placées dans une salle séparée et éloignée.

Les fibres optiques sont utilisées car elles sont immunisées contre les interférences électromagnétiques, présentent une atténuation faible du signal et sont de taille réduite (notamment parce qu'elles n'ont pas besoin d'être blindées). La fibre optique présente toutefois un inconvénient : sa relative fragilité. Le cœur de la fibre se présente sous la forme d'un filament de silice (principal composant du verre) d'un diamètre variant de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres en fonction du type de fibre. À titre de comparaison, le diamètre d'un cheveu humain est de l'ordre de 100 micromètres. Ce cœur de verre peut donc se casser, les faces des connecteurs peuvent se rayer, s'abîmer, se salir ou encore présenter un défaut d'alignement lors de la connexion de deux tronçons. Tous ces défauts se traduisent par une augmentation de l'atténuation totale de la ligne de transmission.

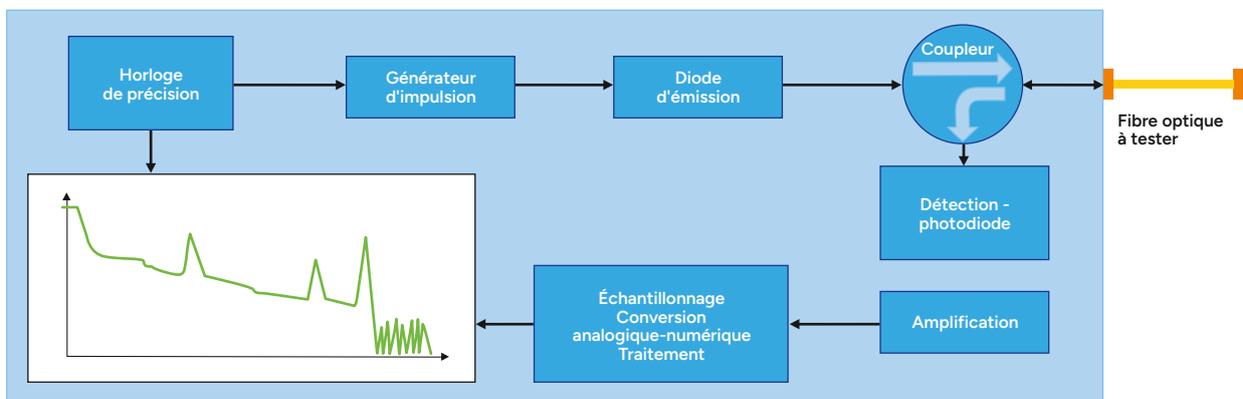
L'atténuation dans une ligne optique est de l'ordre de 0,2 dB/km, c'est-à-dire qu'après 100 km il ne reste plus que 1% de la puissance initiale. Ces pertes sont minimes pour un réseau de télécommunication comme Internet, car la transmission est numérique : une série de 1 (présence de lumière) et de 0 (absence de lumière). Ici, le signal est analogique et, dans certains cas, la partie utile porteuse de l'information est la réflexion d'un laser sur une surface dépolie, qui diffuse la lumière plutôt qu'il la reflète. Ainsi, seule une fraction de la lumière injectée est disponible à la fin de la chaîne d'acquisition. Il est donc important de limiter autant que possible les pertes liées à la ligne de transmission.

Les fibres optiques utilisées dans l'installation peuvent atteindre des longueurs de 50 mètres du capteur à l'unité d'enregistrement, incluant un certain nombre de raccordements. Une fibre abîmée ou mal connectée n'est pas forcément repérable à l'œil nu, et près de 80% de la ligne de transmission est inaccessible ou le devient au fur et à mesure de la préparation de l'expérience. La réflectométrie est alors utilisée pour caractériser ces lignes de bout en bout jusqu'à l'intérieur même du dispositif de confinement.

Un réflectomètre optique est un instrument de test utilisé pour caractériser, dépanner et entretenir les réseaux de fibres optiques. Il fonctionne comme un système de radar : il injecte des impulsions lumineuses provenant d'un laser à travers la fibre et analyse la lumière réfléchi (FIGURE 8). En utilisant des informations obtenues à partir de la lumière renvoyée ou dispersée jusqu'au point d'origine, il fournit à l'utilisateur des données détaillées sur la localisation et l'état général des connexions, défauts et toute autre caractéristique pouvant revêtir un intérêt.

Il est composé d'une diode laser, d'une photodiode et d'un circuit d'horloge ultraprécis qui établit la base

FIGURE 8



→ Schéma de fonctionnement d'un réflectomètre optique utilisé pour tester les fibres optiques.

de temps. La diode émet une impulsion optique à une longueur d'onde spécifique, ici 1550 nm. Celle-ci parcourt la fibre à tester et, tout au long de son parcours et à chaque particularité rencontrée, une quantité de la lumière est soit diffusée, en partie en direction du point d'origine, c'est la rétrodiffusion (voir **ENCADRÉ 2**), soit réfléchi en direction de la photodiode. L'intensité de cette lumière renvoyée et le temps qu'elle met à revenir vers le détecteur indiquent la valeur et le type de perte ainsi que la localisation de l'événement dans la fibre optique.

Les réflectomètres utilisés pour les réseaux télécoms permettent de contrôler jusqu'à 200 km de fibre alors que ceux mis en œuvre à Epure ont une portée plus faible de 70 m. L'avantage de ce type de réflectomètre est son extrême précision : la résolution spatiale atteinte est d'un point tous les 10  $\mu\text{m}$ , permettant de situer et caractériser avec précision les événements décelés. De plus, la technologie utilisée ne présente pas de zone morte, phénomène qui masque deux défauts proches avec des réflectomètres classiques.

### ENCADRÉ 2

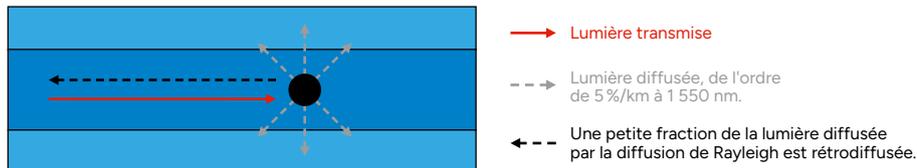
#### Diffusion de Rayleigh et rétrodiffusion

Lord Rayleigh apporta en 1904 la réponse à l'éternelle question des enfants : « Pourquoi le ciel est-il bleu ? » La réponse est connue sous le nom de diffusion de Rayleigh. La lumière du soleil (spectre visible) est perçue comme blanche, mais est en fait composée de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. Lors de sa traversée de l'atmosphère, les longueurs d'onde proches du bleu sont diffusées, dispersées dans toutes les directions de l'espace par les molécules de l'atmosphère, plus que les autres qui traversent en ligne droite ; quelle que soit la position sur le globe terrestre, la couleur bleue domine ainsi notre perception optique du ciel.

Lorsque de la lumière est injectée dans une fibre, une partie subit la diffusion de Rayleigh dans des directions aléatoires à cause des défauts présents dans la silice. Une petite partie est donc renvoyée dans la direction opposée à celle de la lumière transmise ; on appelle ce phénomène rétrodiffusion.

La nature prévisible de la diffusion de Rayleigh est utilisée comme principe de fonctionnement par la technologie de réflectométrie. La quantité d'énergie lumineuse issue de la source et rétrodiffusée vers le détecteur fournit une indication fiable de l'affaiblissement du signal (ou perte optique) au sein de la liaison fibre optique (**FIGURE E2**).

FIGURE E2



—> Schéma explicatif de la diffusion de Rayleigh dans une fibre.

R. Parouty CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

T. Sun, N. Bourdon CEA - DAM, centre de Valduc

# Les moyens de confinement et leur cycle de vie

# 1d

Comme dans l'industrie nucléaire, l'exigence de sûreté requise pour l'installation Epure est très élevée. Elle est basée sur une maîtrise des risques qui assure que les équipes du CEA - DAM peuvent réaliser les expériences en toute sécurité, pour elles-mêmes, pour les populations et pour l'environnement. Les moyens de confinement sont des organes clés de cette exigence. Nous en détaillons le cycle de vie.

## Principes de la sûreté nucléaire

La spécificité de l'installation Epure est de réaliser des expériences d'hydrodynamique mettant en jeu de l'explosif et de la matière nucléaire. Pour la partie nucléaire, au même titre que les centrales nucléaires ou que la médecine nucléaire, cela nécessite de se conformer à la réglementation française et internationale. Dès la conception de l'installation, le CEA-DAM a dû réaliser des études de sûreté nucléaire pour démontrer que la matière nucléaire serait maîtrisée tout au long des processus et que les personnes et l'environnement ne seraient pas mis en danger.

La première étape de la sûreté nucléaire est de définir l'exigence de sûreté. Cette exigence s'exprime par une probabilité maximale admissible d'un rejet de matière nucléaire au cours d'une expérience. L'exigence retenue revient à garantir que moins d'un rejet interviendra sur l'équivalent de 100 000 ans d'utilisation de l'installation. Cette forme d'exigence est issue des référentiels de sûreté applicables aux armes au sein des projets du CEA-DAM.

Les étapes suivantes de la sûreté nucléaire consistent en une démonstration du respect de cette exigence de sûreté. La démonstration décrit et analyse de plus en plus finement l'installation jusqu'aux composants et opérations de base et définit les paramètres clés contribuant à l'exigence de sûreté. Les équipes de conception et de sûreté s'appuient à la fois sur la modélisation numérique et sur des résultats expérimentaux pour définir les valeurs adéquates de ces paramètres clés. Communément, c'est la marge prise sur ces valeurs qui

assure le niveau de probabilité attendu. Les industriels en phase de fabrication et les équipes d'exploitation de l'installation Epure doivent alors fournir un suivi spécifique de ces paramètres clés.

Tout écart constaté sur un de ces paramètres clés doit être déclaré, analysé et corrigé avant de pouvoir poursuivre le cycle opératoire. Ces écarts alimentent un dispositif de retour d'expérience pour éviter leur réapparition ultérieure.

Tous ces éléments constituent le socle de la maîtrise des risques adapté au niveau d'exigence défini. Le CEA-DAM soumet l'ensemble de ces éléments à l'Autorité de sûreté nucléaire de défense (ASND) qui autorise l'exploitation lorsqu'elle juge le dossier sûr.

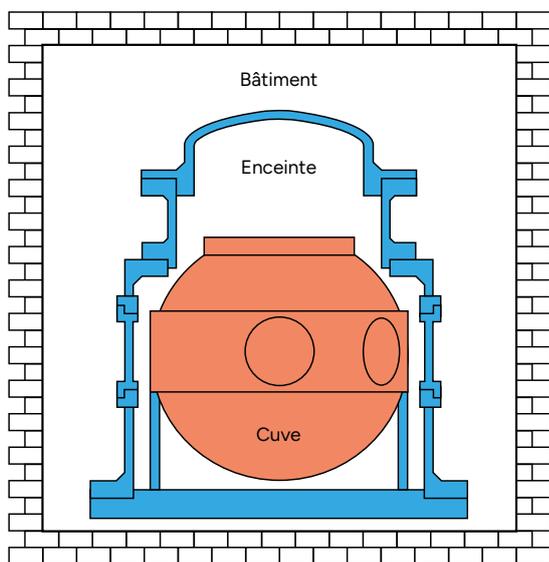
## Une prise en compte des exigences dès la conception

Le rôle des moyens de confinement dans lesquels se déroulent les expériences à Epure est double :

- confiner la matière nucléaire en toutes circonstances d'exploitation avec une performance d'étanchéité très élevée;
- protéger l'installation des effets de l'explosion expérimentale (souffle, éclats, température, etc.).

L'idée principale de conception s'appuie sur le principe des poupées gigognes (FIGURE 1). Une enceinte de sécurité entoure une cuve (FIGURE 2) et forme le dispositif de confinement ou DCo. Cela permet de créer une cascade de dépressions entre l'extérieur de l'installation et le dispositif de confinement dirigeant les fuites vers

FIGURE 1

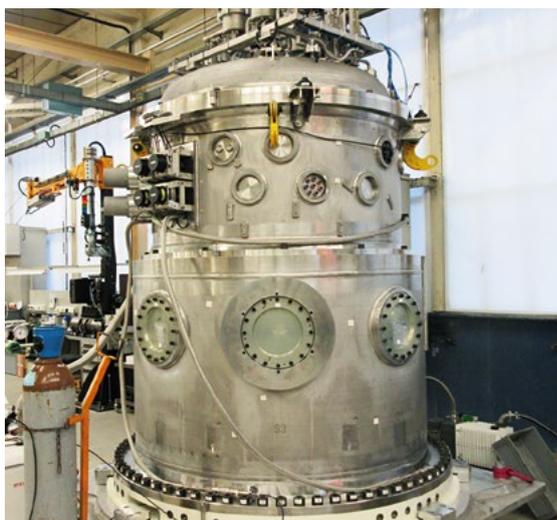


→ Principe des poupées gigognes dont les cascades de dépression dirigent les fuites vers l'intérieur de l'enceinte de sécurité.

l'intérieur de l'enceinte. La maîtrise de cette cascade de dépressions est primordiale pour éviter les rejets à l'extérieur de l'installation.

Les assemblages vissés, les circuits pneumatiques, électriques et optiques nécessaires au bon fonctionnement de l'expérience traversant

FIGURE 2



→ Photographie d'un dispositif de confinement en configuration trois axes en fin d'assemblage chez le fabricant (3 m de haut environ).

l'enceinte de sécurité constituent autant de sources de fuites potentielles. De nombreux paramètres clés concernent donc la maîtrise de ces assemblages et de ces traversées pour assurer le niveau d'étanchéité final attendu.

Les équipes de sûreté sont intégrées aux équipes de conception afin de s'assurer que toutes les exigences de sûreté sont bien prises en compte dans le produit final. Elles transmettent leurs conclusions aux industriels fabricants et aux équipes d'exploitation de sorte que toutes les équipes de la chaîne opératoire appliquent les règles de sûreté.

### Traitement des axes radiographiques

Le dispositif de confinement interpose nécessairement des épaisseurs de matière sur le parcours des rayons X, alors que pour la qualité des radiographies obtenues, les faisceaux de rayons X doivent être atténués le moins possible.

Un effort de conception est porté sur cet aspect afin de définir le bon compromis entre sûreté et radiographie. Pour la sûreté, les matériaux de la cuve et de l'enceinte doivent être résistants et épais alors que la radiographie requiert le moins de matière possible sur les axes radiographiques.

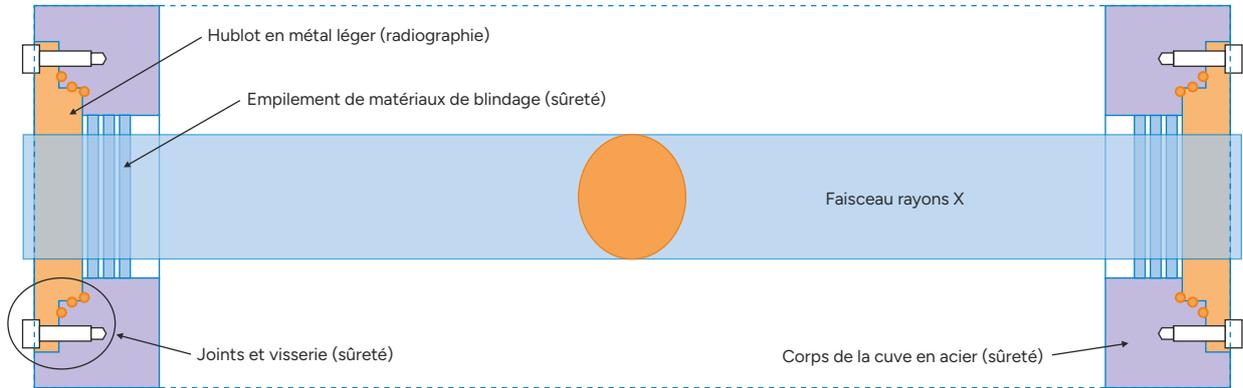
### Solutions technologiques

Le principe de solution repose sur un corps de la cuve massif, en acier haute performance, avec des ouvertures au niveau des axes radiographiques. Des hublots en métal moins dense ferment ces ouvertures pour le passage des rayons X. Des joints d'étanchéité redondés et des procédures précises de vissage assurent le niveau d'étanchéité. Des matériaux légers de blindage protègent ces hublots des effets de la détonation de l'édifice (voir [FIGURE 3](#)). À partir de 2014, les premières cuves pour les expériences à un axe sont réalisées en soudant les différentes parties fabriquées séparément selon un retour d'expérience maîtrisé.

Pour un fonctionnement à trois axes, le soudage n'est pas utilisable, car les ouvertures sont trop proches pour assurer le niveau de résistance requis ([FIGURE 4](#)). La conception s'est alors orientée vers une cuve monobloc, forgée, usinée et sans soudure. L'effort de conception et fabrication a fait l'objet d'un travail collaboratif entre le CEA-DAM et l'industriel forgeron afin d'établir l'alliage métallique adapté et le mode de fabrication répondant aux exigences fonctionnelles et de sûreté du dispositif de confinement.

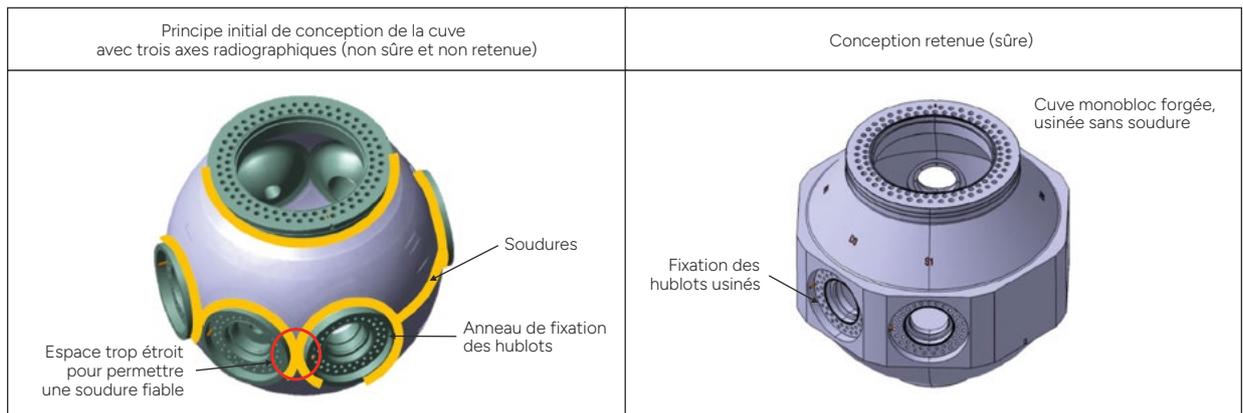
Comme pour toute évolution significative d'un produit, l'équipe de sûreté a mis à jour le dossier de sûreté sur la base de la nouvelle conception et l'a soumis à nouveau à l'ASND.

FIGURE 3



→ Coupe de la cuve selon un axe de radiographie : schématisation des éléments de la cuve répondant au compromis entre contraintes de sûreté et besoins radiographiques.

FIGURE 4



→ Intégration de trois axes radiographiques dans la conception de la cuve.

### Évolution future

La prochaine évolution pour les dispositifs de confinement est l'expérimentation future d'objets expérimentaux plus gros. Parce qu'ils emporteront une masse d'explosif plus importante que ceux actuellement expérimentés, ces objets expérimentaux créent des contraintes mécaniques plus importantes sur le dispositif de confinement.

L'augmentation du volume interne de la cuve et de son épaisseur est une réponse à ces nouvelles contraintes mécaniques. Toutefois, le hall d'expérience dans Epure ne permet qu'un volume disponible délimité pour le dispositif de confinement. L'augmentation dimensionnelle de la cuve lui fait atteindre les limites du volume disponible, il n'y a alors plus de place pour l'enceinte de sécurité. Le nouveau défi pour les équipes de conception et de sûreté est la redéfinition du principe de poupées gigognes et des systèmes associés.

La sûreté devra notamment réévaluer les sollicitations issues du nouvel objet expérimental et leur propagation au sein de la nouvelle structure du dispositif de confinement afin de définir les marges adéquates. Ce travail de conception est en cours pour une première expérience prévue à l'horizon 2030.

### Les phases de vie d'un dispositif de confinement au sein de l'installation Epure

À sa livraison dans l'installation Epure, un DCo est tout d'abord soumis à un montage à blanc dans un hall de préparation (voir l'ARTICLE 1b p. 6). Après validation de ce montage et de ses fonctionnalités, le DCo est acheminé dans un hall d'assemblage et d'intégration où il est constitué autour de l'édifice expérimental. Il est ensuite déplacé dans le hall d'expérience où se

FIGURE 5



→ Photographie du dispositif de confinement français en configuration deux axes.

déroulera l'expérience. À la suite de celle-ci, afin de respecter les conditions de sûreté et de sécurité propres à l'installation, un traitement des gaz post-expérimentaux est effectué dans le DCo (voir le paragraphe « Traitement des produits de

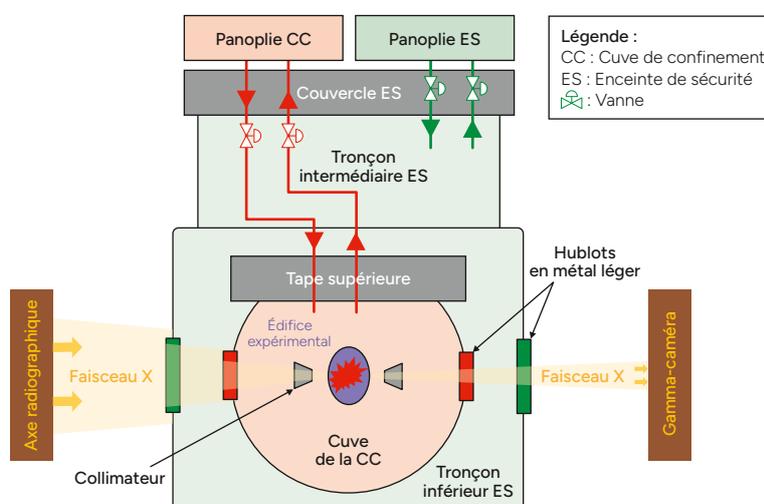
détonation issus de l'expérience dans le DCo » p. 21). La dernière étape consiste à transporter le DCo dans un hall d'entreposage adapté (voir le paragraphe « Entreposage des dispositifs de confinement » p. 23).

### Les dispositifs de confinement et les moyens de transport associés

Présenté sur la FIGURE 5, le DCo a pour mission d'assurer le confinement de la matière nucléaire, dans la durée, à la suite d'une expérience. Une première barrière de confinement est assurée par une cuve de confinement dans laquelle est réalisée l'expérience hydrodynamique. La cuve de confinement est dimensionnée pour résister aux effets pyrotechniques de l'expérience, fermée par un bouchon, aussi appelé tape supérieure, en dessous duquel est placé l'édifice expérimental (FIGURE 6). Afin d'assurer un confinement secondaire, la cuve de confinement est contenue dans une enceinte de sécurité. Celle-ci est composée d'un tronçon inférieur, d'un tronçon intermédiaire et d'un couvercle. La gestion des atmosphères gazeuses dans la cuve de confinement et dans l'enceinte de sécurité est réalisée par des panoplies de filtration propres à chaque ensemble.

Afin de permettre de radiographier l'expérience un court instant après l'amorçage des explosifs, des « fenêtres » spécifiques à la cuve et à l'enceinte sont placées sur le chemin du faisceau de rayons X, elles sont appelées hublots. Ils sont fabriqués en métal léger et ils permettent au faisceau X de traverser le dispositif de confinement. Des collimateurs sont

FIGURE 6



→ Schématisation des DCo utilisés à Epure.

FIGURE 7



—> Système de transfert du dispositif de confinement en configuration deux axes pour son déplacement dans les couloirs de l'installation.

également ajoutés dans la cuve, juste devant l'édifice, afin de sculpter le faisceau de rayons X sur l'édifice expérimental et de fournir ainsi les images radiographiques avec la qualité attendue.

Du fait de leur dimensionnement pour résister aux effets pyrotechniques, les DCo sont des équipements imposants de plusieurs mètres de hauteur et plusieurs dizaines de tonnes. Leur déplacement au sein de l'installation Epure est réalisé par deux équipements de transfert développés spécifiquement pour répondre aux exigences de sûreté et aux dimensions des couloirs de l'installation. Le premier système de transfert, présenté sur la **FIGURE 7**, permet de déplacer le DCo dans l'installation, au ras du sol, tout en le protégeant des diverses agressions extérieures. Ce système de transfert ne permettant pas d'assurer le positionnement du DCo dans le hall d'expérience, un second système de transfert, présenté sur la **FIGURE 8**, est utilisé pour positionner le DCo sur le point d'expérience. Il permet également son transfert dans les locaux d'entreposage. Ce second système a été conçu pour s'adapter à l'environnement dense du hall d'expérience. Ces équipements sont pilotés par deux personnes afin de pouvoir visualiser l'environnement lors du déplacement, qui s'effectue à quelques centimètres des murs, dans les passages de portes notamment.

### Préparation du dispositif de confinement pour une expérience à Epure

Le dispositif de confinement est livré dans l'installation Epure, désassemblé, plusieurs mois avant une expérience. À la suite de cette livraison, le DCo est assemblé dans un hall de préparation, commun aux deux nations du traité Teutates. Il s'agit de réaliser un maquettage à blanc, sans matière pyrotechnique

ni nucléaire. En plus de la qualification du personnel à l'assemblage du DCo, ce maquettage permet de vérifier également les conformités de tous les équipements et mesures mis en place dans le DCo, son étanchéité une fois assemblé, sa capacité à supporter la pression issue de l'expérience, et ses capacités de filtration. Lors de ces actions, des équipements nécessaires à l'expérience sont également ajoutés au DCo.

Après avoir été qualifié dans le hall de préparation, le DCo est démonté et transféré dans le hall d'assemblage et d'intégration de la nation réalisant l'expérience. Dans ce hall, l'édifice expérimental, composé de matières pyrotechnique et nucléaire, est d'abord assemblé puis accroché sous la tôle supérieure de la cuve de confinement. La fixation de la tôle supérieure sur la cuve de confinement est ensuite réalisée dans le cadre de l'opération d'intégration. L'enceinte de sécurité est alors assemblée et enfin les panoplies de filtration sont installées sur le DCo. Durant toutes ces opérations d'assemblage, des contrôles sont effectués sur celui-ci afin de garantir son étanchéité et assurer le confinement de la matière nucléaire.

FIGURE 8



—> Système de transfert du dispositif de confinement en configuration deux axes pour son approche et son positionnement au point d'expérience.

FIGURE 9



→ Dispositif de confinement en configuration deux axes dans le hall d'expérience.

Après avoir été assemblé et déclaré étanche, le DCo est acheminé via les systèmes de transfert et positionné dans le hall d'expériences (FIGURE 9). Il est ensuite raccordé aux différents procédés de ventilation de ce hall.

### Traitement des produits de détonation issus de l'expérience dans le DCo

Un explosif est composé de molécules organiques complexes qui se décomposent lors du passage de l'onde de détonation pour former un mélange gazeux composé de molécules moins complexes telles que  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ . Le mélange gazeux ainsi formé regroupe les produits de détonation.

Lors d'une expérience à Epure, les produits de détonation sont confinés dans la cuve de confinement. Ils créent ainsi une atmosphère à haute pression et à haute température qui nécessite un traitement. Les objectifs post-expérience pour l'installation Epure sont de dépressuriser et de rendre inerte la cuve de confinement. La mise sous gaz inerte de la cuve de confinement permet d'évacuer les composés chimiques potentiellement inflammables contenus dans les produits de détonation.

Pour réaliser la dépressurisation et rendre inerte la cuve de confinement, l'installation Epure

FIGURE 10

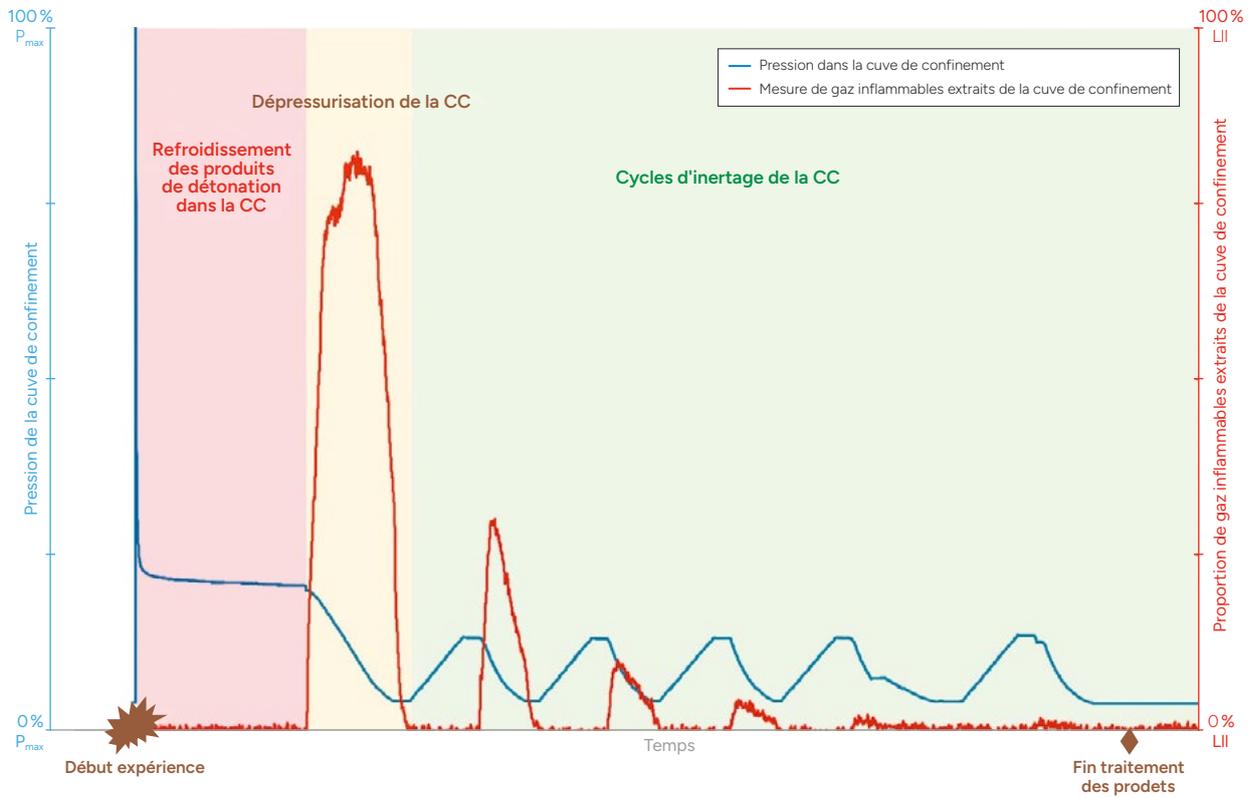


→ Procédé VGMS (pour Vessel Gas Management System) du hall d'expérience, qui réalise le traitement post-expérience des gaz.

exploite le procédé dit VGMS, pour *Vessel Gas Management System* (voir FIGURE 10). Le procédé VGMS permet d'introduire un gaz inerte (azote) dans la cuve de confinement et de diluer les produits de détonation extraits de cette même cuve. La dilution et la surveillance des concentrations volumiques des gaz inflammables permettent de garantir que le mélange gazeux rejeté est non inflammable.

Le traitement des produits de détonation, présenté sur la FIGURE 11, est composé de plusieurs cycles d'inertage successifs comprenant des phases de pressurisation de la cuve de confinement par un gaz inerte, puis des phases de dépressurisation du mélange gazeux dans le procédé VGMS. La première phase (zone rouge sur la figure) est une phase de refroidissement et de stabilisation de la pression des produits de détonation contenus dans la cuve de confinement. À l'issue de cette première phase, la cuve de confinement est dépressurisée en exploitant le procédé VGMS (zone jaune sur la figure). La dépressurisation des produits de détonation est pilotée par la surveillance continue des concentrations des composés chimiques inflammables contenus dans les produits de détonation. Cette surveillance permet de garantir que le mélange gazeux rejeté reste toujours en dessous de sa limite inférieure d'inflammabilité. Une fois la première dépressurisation effectuée, plusieurs cycles de mise en pression et dépressurisation de la cuve de confinement sont réalisés (zone verte sur la figure). Ces cycles successifs permettent de réduire de manière significative la quantité de composés

FIGURE 11



→ Traitement des produits de détonation issus d'une expérience à Epure (l'échelle de temps est représentée sur plusieurs heures).

chimiques inflammables et de réaliser ainsi un entreposage en sécurité du dispositif de confinement.

### Entreposage des dispositifs de confinement

À la suite de l'expérience et du traitement post-expérience des gaz, le dispositif de confinement est déconnecté des procédés expérimentaux, puis transféré et entreposé dans un des halls d'entreposage, jusqu'à son retraitement ou son démantèlement. Dans ce hall commun aux deux nations du traité Teutatès, les dispositifs de confinement sont connectés à un procédé assurant la ventilation et la surveillance permanente de la cuve de confinement et de l'enceinte de sécurité. Ce procédé assurant l'entreposage des dispositifs de confinement a plusieurs missions :

- assurer le confinement de la matière nucléaire par une cascade de dépressions mise en œuvre et entretenue entre le local, l'enceinte de sécurité et la cuve de confinement ;
- évacuer l'hydrogène formé par la radiolyse des matériaux hydrogénés en ventilant les cuves de confinement et enceinte de sécurité ;
- vérifier l'intégrité des cuves de confinement et des enceintes de sécurité par surveillance des atmosphères contenues dans celles-ci.

En plus du procédé d'entreposage effectuant la surveillance de l'état des dispositifs de confinement, des contrôles périodiques sont effectués sur ceux-ci afin de garantir leur étanchéité et le bon fonctionnement du procédé d'entreposage.

# Description d'une chaîne de radiographie

2a

Dans le contexte des expériences hydrodynamiques, tout l'art de la radiographie éclair consiste à explorer le cœur d'un objet au moment où il est le plus comprimé. Pour relever ce défi, les expérimentateurs construisent une chaîne radiographique exploitant au maximum les capacités de l'installation.

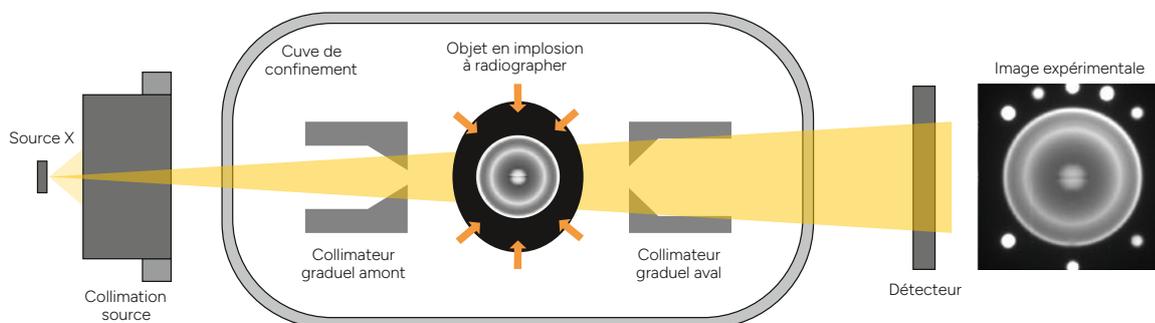
La connaissance des axes radiographiques, de leurs atouts et de leurs limites est un prérequis pour réaliser une expérience. L'installation Epure, dans sa configuration à trois axes, augmente les capacités et les performances des expériences hydrodynamiques françaises et britanniques.

La chaîne radiographique est l'ensemble des éléments mis en œuvre pour réaliser des mesures de radiographie éclair : elle comprend la source X, le dispositif de confinement, l'objet, son environnement proche et les détecteurs (FIGURE 1).

Chaque chaîne radiographique est conçue pour être adaptée aux phénomènes hydrodynamiques

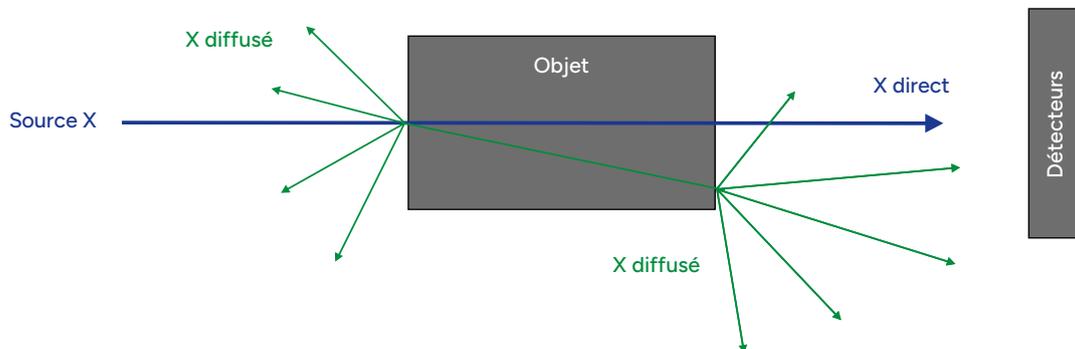
à observer. L'objectif est d'obtenir la meilleure qualité d'image possible afin d'en extraire les informations qui sont nécessaires pour répondre aux besoins des concepteurs d'armes. Le besoin réside à la fois dans la distinction de détails au sein de l'objet comprimé et dans la reconstruction en masse volumique de l'objet. L'installation Epure dispose de trois sources X disposant de caractéristiques différentes et disposées suivant trois axes autour de l'objet (voir l'ARTICLE 2c p. 29). Le choix des axes et l'évaluation de la capacité à observer le phénomène passent par la simulation de l'expérience ainsi que par la meilleure connaissance possible de chaque élément.

FIGURE 1



→ Schéma d'une chaîne radiographique composée d'une source X, d'une collimation source limitant le cône d'éclairage X à la dimension de l'objet, ce dernier entouré de collimateurs graduels, et du détecteur enregistrant l'image radiographique. Dans cette figure, l'objet est une maquette d'étude et de caractérisation de la chaîne radiographique.

FIGURE 2



→ Schéma illustrant l'interaction des photons X avec un objet. La majorité des photons traversant l'objet suit une trajectoire rectiligne en étant atténuée : c'est le signal direct. Certains photons vont voir leur trajectoire déviée : c'est le rayonnement diffusé.

Le premier élément de la chaîne radiographique est la source X. Elle pilote les capacités de pénétration des photons dans l'objet et contribue fortement à la résolution de l'image. Ces sources X sont caractérisées par la dose émise, leur taille, leur forme et leur orientation lors de campagnes expérimentales dédiées. Leur fonctionnement est adapté au besoin expérimental.

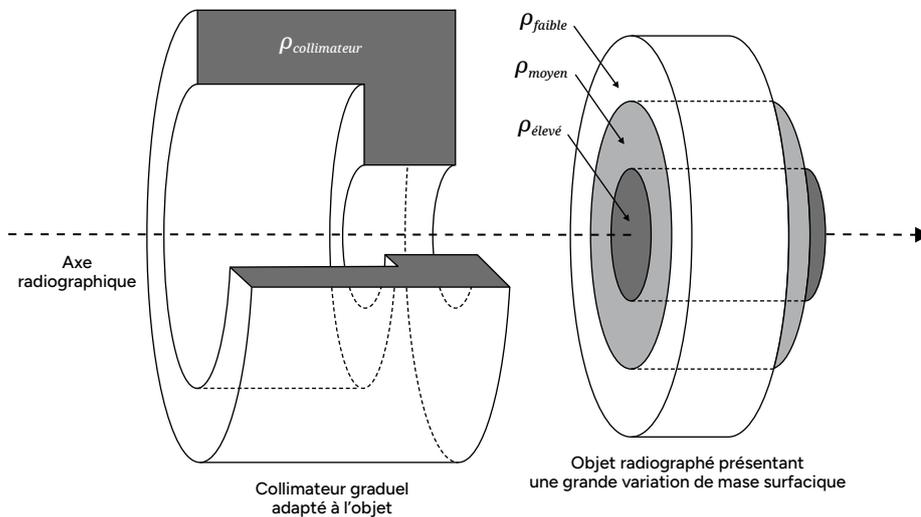
Comme dans toute acquisition de données, on cherche à maximiser le rapport signal à bruit. Dans le contexte d'une mesure radiographique, le signal d'intérêt est appelé signal direct, car il s'agit des photons ayant atteint le détecteur directement depuis la source et à travers l'objet étudié (FIGURE 2). Les rayonnements diffusés ont atteint, au contraire, le détecteur après une ou plusieurs diffusions et ne portent pas d'information pertinente. Le rayonnement diffusé ne pouvant être discriminé du signal direct, sur les détecteurs, il est nécessaire de le minimiser. La conception de la chaîne radiographique se concentre donc sur l'optimisation du rapport entre rayonnement direct et diffusé.

Pour cela, nous dimensionnons des collimateurs placés au plus proche de l'objet qui permettent de bloquer le rayonnement diffusé créé en amont de l'objet. Ces collimateurs sont qualifiés de graduels, car ils permettent d'adapter le contraste sur le détecteur. En effet, l'objet présente de grands gradients de masse surfacique qui induisent une dynamique à mesurer trop importante. Pour réduire cette dynamique, les collimateurs sont façonnés afin d'ajouter graduellement de la matière sur le trajet des photons X dans les zones de l'objet où ils ne seraient pas assez atténués (FIGURE 3). Ainsi, l'atténuation des photons est du même ordre de grandeur sur l'ensemble de la zone de mesure et la dynamique de mesure reste contenue dans le détecteur.

La forte compensation en masse surfacique nécessite que les collimateurs soient usinés dans un matériau de masse volumique élevée (plomb, tungstène, etc.). De plus, ils contribuent à la sûreté de l'expérience en interceptant une partie des éclats provenant de l'objet lors de son fonctionnement. D'un point de vue plus global, la sûreté de l'expérience au sein de l'installation Epure est assurée en grande partie par l'utilisation d'un dispositif de confinement de l'objet (voir l'ARTICLE 1d p. 16). Il permet à la fois de confiner les effets thermodynamiques de sa détonation (éclats, souffle, effets thermiques, etc.) et, dans le cas d'objets mettant en œuvre des matières nucléaires ou polluantes, d'empêcher tout rejet. L'emploi d'un dispositif de confinement impose donc l'ajout de matériaux sur la chaîne radiographique pour réaliser la mesure. Lors de sa conception, un compromis doit être obtenu entre l'épaisseur minimale pour garantir la sûreté et l'épaisseur maximale permettant de réaliser une mesure des objets d'intérêt.

Les détecteurs utilisés à Epure sont développés depuis de nombreuses années et continuent d'évoluer (voir l'ARTICLE 2d p. 32). Nous disposons de deux types de détecteurs : le premier est basé sur l'empilement d'écrans radioluminescents à mémoire (ERLM), le second, appelé gamma-caméra, est basé sur l'emploi d'un scintillateur associé à un capteur numérique de type *charge-coupled device* (CCD). L'installation Epure impose une position fixe du dispositif de confinement et donc de l'objet relativement aux sources. Le seul moyen de changer la taille de l'image projetée sur les détecteurs est donc de déplacer ces derniers par rapport à l'objet. L'objectif est d'exploiter au mieux les surfaces de mesure de chacun des détecteurs. Dans le contexte d'une expérience multiaxe, le positionnement

FIGURE 3



→ Schéma de principe d'un collimateur graduel adapté à un objet présentant une grande variation de masse surfacique  $\rho$ . Les dimensions externes sont d'une dizaine de centimètres.

des détecteurs doit également être ajusté pour tenir compte du rayonnement diffusé provenant des autres sources X voisines (voir l'ARTICLE 2b p. 27). Des protections spécifiques ont été dimensionnées et disposées à cet effet autour des machines et des détecteurs.

L'ensemble des éléments de la chaîne radiographique décrits précédemment sont caractérisés et modélisés par simulation numérique. Celle-ci permet la conception des collimateurs graduels, la prévision des radiographies attendues et l'exploitation des mesures réalisées. La connaissance précise

de tous les éléments mis en œuvre sur chaque chaîne radiographique nous permet de produire un jumeau numérique du hall expérimental de l'installation Epure pour chaque expérience.

Environ deux années sont nécessaires pour mettre en œuvre le processus de réalisation d'une expérience froide, de la conception à l'exploitation des résultats. L'expérience hydrodynamique, elle, dure moins de 100  $\mu$ s au sein de la cuve et les impulsions X qui vont permettre de produire les images radiographiques aux instants d'intérêt ont une durée inférieure à 100 ns.

A. Friou CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

# Installation multiaxe

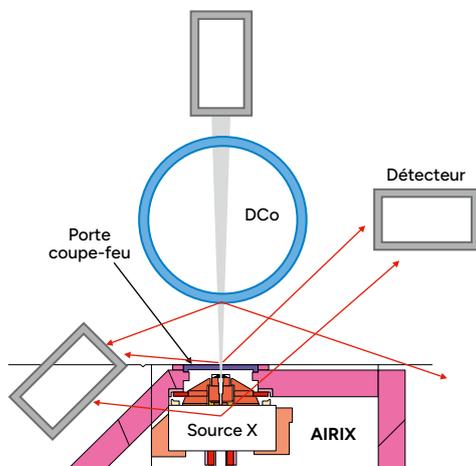
# 2b

Dès le début de la conception de l'installation Epure, la question s'est posée de savoir quel serait l'effet du fonctionnement d'un axe sur les détecteurs des autres axes. Cette question est restée longtemps sans réponse claire, en raison de la limitation des moyens de simulation de l'époque et du manque de données expérimentales.

À la fin de la construction de la phase 1 (utilisant un seul axe radiographique), des campagnes expérimentales ont été menées pour apporter des éléments de réponse. En plaçant des détecteurs dans la salle d'expérience, mais en dehors du faisceau X, on a caractérisé le rayonnement appelé diffusé croisé. Il s'agit du rayonnement provenant de la déviation (ou encore, diffusion) du faisceau radiographique sur les équipements de la salle d'expérience, vers les détecteurs des autres axes radiographiques. La **FIGURE 1** illustre les chemins empruntés par le rayonnement diffusé dans le cas du fonctionnement de l'axe 1.

Un principe général est que tous les éléments placés sur le trajet du faisceau sont susceptibles de diffuser du rayonnement dans le reste de la salle d'expérience. C'est principalement le cas pour la porte coupe-feu et les fenêtres d'entrées du DCo (dispositif de confinement). Une dernière contribution s'ajoute, venant directement de la cible de conversion. En effet, le rayonnement X produit étant très intense et peu directionnel, il parvient à passer à travers les murs en béton entourant

FIGURE 1



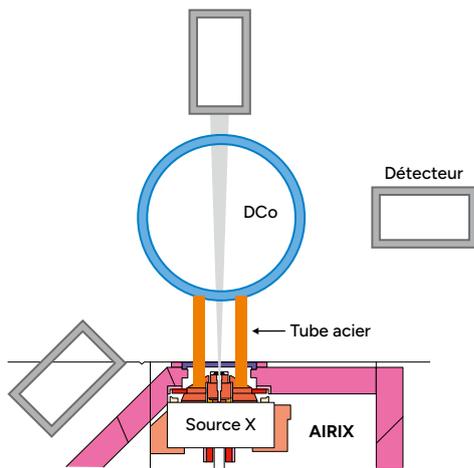
→ Vue schématique (de haut) de l'installation Epure phase 1. Le faisceau X est en gris clair, le rayonnement diffusé est représenté par les flèches rouges.

FIGURE 2



→ Image mesurée par le détecteur de l'axe 2 lors d'un flash sur l'axe 1. L'ombre de certains équipements apparaît sur l'image (zone plus sombre à gauche), ce qui rend une radiographie inexploitable.

FIGURE 3



→ Vue schématique d'Épure phase 1. Sans contrainte sismologique, la solution la plus évidente pour confiner le rayonnement diffusé serait de relier l'axe 1 (Airix) au DCo par un tube en acier. Cependant, les risques sismologiques font que cette solution est inapplicable.

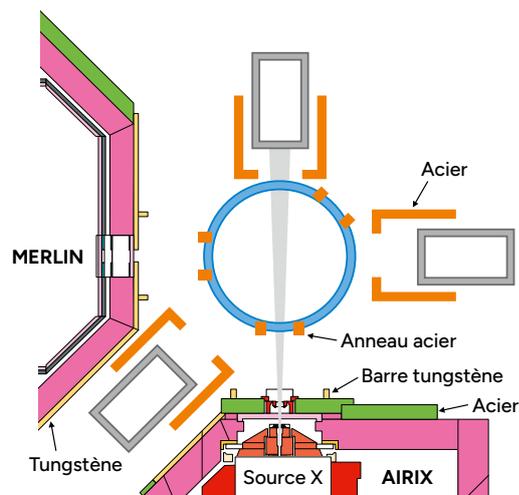
la partie terminale de l'accélérateur du premier axe. Les campagnes expérimentales menées ont permis de montrer que le signal capté par le détecteur de l'axe 2 est dix fois supérieur au niveau acceptable, avec un fort gradient latéral, comme le montre la FIGURE 2. Or, pour garantir la bonne qualité de la radiographie, deux conditions sont nécessaires : une certaine limite ne doit pas être dépassée et le rayonnement diffusé doit avoir une empreinte homogène sur le détecteur. Par rapport à la mesure de la FIGURE 2, un facteur 10 doit donc être à gagner, tout en réduisant au mieux le gradient du signal. Des travaux ont ainsi été lancés pour concevoir des protections, dites anti-diffusés, permettant d'atténuer ces rayonnements jusqu'à un niveau acceptable. Le passage de l'installation en phase 2 et la modification du hall d'expérience pour l'accueil des deux axes de radiographie supplémentaires a offert l'opportunité de les installer.

Une contrainte importante est à prendre en compte lors de la conception des protections anti-diffusés, il s'agit du risque sismologique. Lors d'un séisme, en aucun cas le DCo ne doit taper contre un mur ou les équipements qui l'entourent. Cela veut

dire qu'il y a une zone d'exclusion autour du DCo, où on ne pourra pas positionner de protection anti-diffusés. Dès lors, la solution la plus évidente et la plus efficace, consistant à relier par un tube l'entrée du DCo à la sortie des machines radiographiques (voir FIGURE 3), est exclue.

Les protections anti-diffusés ajoutées à l'installation sont visibles sur la FIGURE 4. Pour atténuer le rayonnement allant de la source aux détecteurs des autres axes en passant à travers les murs de béton, ceux-ci ont été recouverts de tuiles de tungstène (épaisseur 4 cm) et de plaques d'acier (épaisseur 12 cm). Cette protection supplémentaire est très efficace et remplit bien son rôle. Pour se prémunir du rayonnement diffusé restant, provenant de la porte coupe-feu et du DCo, des barres en tungstène ont été placées de part et d'autre de la porte coupe-feu, des anneaux en acier ont été disposés sur le DCo et des plaques en acier de chaque côté des détecteurs. Ces dispositifs permettent ainsi de réduire les lignes de fuite à un niveau acceptable tout en garantissant l'homogénéité sur l'image.

FIGURE 4



→ Vue schématique d'Épure phase 2 avec les dispositifs anti-diffusés : plaques en acier et en tungstène sur les murs, anneaux en acier disposés sur le DCo et plaques en acier de chaque côté des détecteurs.

# Source de rayonnement X



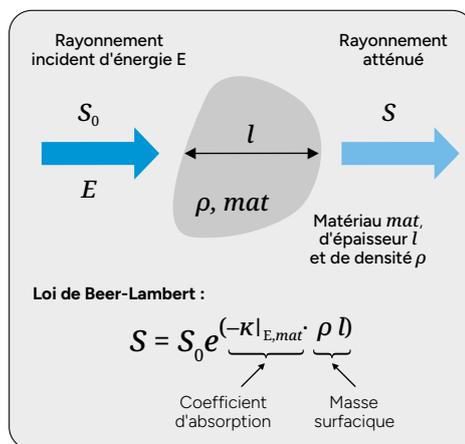
L'installation Epure exploite trois machines radiographiques permettant de générer des photons X avec des énergies suffisamment élevées pour pénétrer le dispositif de confinement et les objets à étudier. Ces machines répondent à un besoin que l'on ne retrouve nulle part dans l'industrie. Elles sont donc spécifiques et résultent de plusieurs décennies de recherche et développement menés au sein du CEA - DAM. L'utilisation de ces machines nécessite un savoir-faire unique tant en matière de conception que d'exploitation.

Les expériences hydrodynamiques nécessitent des sources X spécifiques en matière d'énergie, de taille et de dose. Ces expérimentations sont très particulières dans le sens où elles sont brèves et mettent en œuvre des matériaux lourds et comprimés atteignant des densités très élevées (plusieurs fois leur valeur initiale). En conséquence, les machines radiographiques doivent fournir une dose élevée pour garantir un signal suffisant sur le détecteur, une émission très brève (< 100 ns) pour éviter le flou de bougé de l'objet et des énergies élevées afin de traverser des matériaux présentant de forts taux d'absorption.

Le besoin d'une énergie élevée est dicté par les matériaux mis en œuvre dans la cuve. L'atténuation du rayonnement dans un matériau est déterminée par trois grandeurs : sa masse volumique  $\rho$ , son épaisseur  $l$  ainsi que le coefficient d'absorption massique  $\kappa$  dépendant de l'énergie du rayonnement et du matériau. L'équation de Beer-Lambert sur la FIGURE 1 décrit l'atténuation du rayonnement incident dans un matériau.

Les matériaux mis en œuvre dans la cuve (aluminium, titane, acier, tantale, etc.) ont des masses volumiques et des coefficients d'atténuation  $\kappa$  élevés. En étudiant la variation des coefficients d'atténuation de ces matériaux en fonction de l'énergie du rayonnement incident (FIGURE 2), on constate un minimum d'absorption entre 4 MeV et 20 MeV. L'exploitation des photons X générés par nos sources radiographiques sera optimale si celles-ci possèdent des énergies de rayonnement incident dans cette plage. L'ordre de grandeur des atténuations rencontrées peut atteindre  $10^4$ .

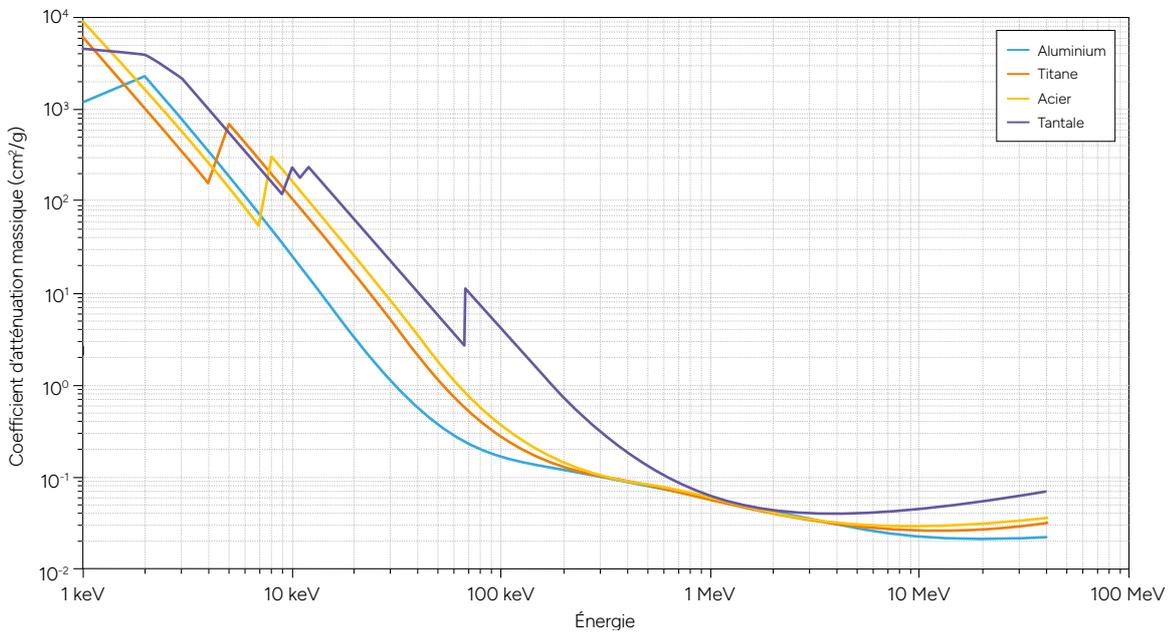
FIGURE 1



→ Description du modèle d'atténuation d'un rayonnement traversant un matériau.  $S_0$  et  $S$  représentent l'intensité du flux de rayonnement initial et atténué respectivement.

À Epure, le principe physique utilisé pour générer des photons X est le rayonnement de freinage émis par le ralentissement d'électrons par des atomes (voir l'ARTICLE 3a p. 34). La technique utilisée sur ces machines consiste à accélérer des électrons jusqu'à l'énergie désirée et à les faire interagir avec une cible en tantale (FIGURE 3). La dose  $D$  produite par la machine est l'intégrale du spectre en énergie des photons et dépend du courant  $I$  – proportionnel à la quantité d'électrons –, de l'énergie de ces électrons  $E$  et du temps  $\Delta t$  durant lequel ils frappent la cible :  $D \propto I \cdot E^\alpha \cdot \Delta t$ , avec  $\alpha \approx 2,7$

FIGURE 2



→ Coefficient d'absorption massique en fonction de l'énergie pour des matériaux d'intérêt.

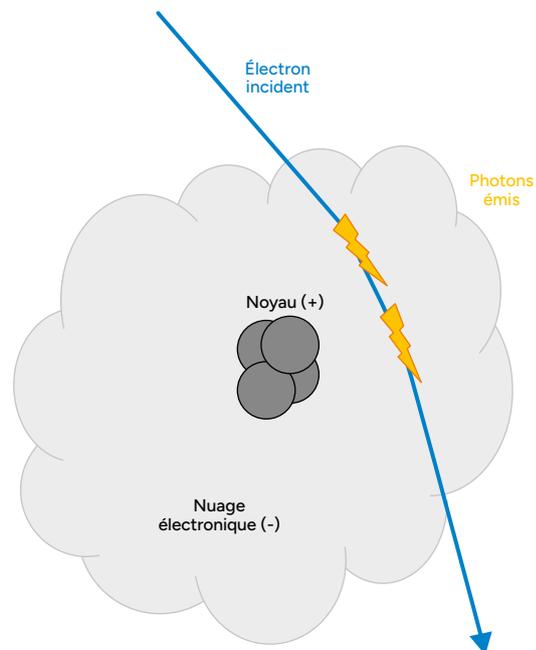
(déterminé empiriquement). Le rayonnement X produit n'est pas monoénergétique et possède un spectre s'étendant de zéro à l'énergie maximale des électrons impactant la cible.

Les photons X émergent de la cible depuis une surface réduite, caractéristique de la performance de la machine. Le cône d'émission de ce flux de rayons X, appelé lobe, est centré sur la direction des électrons incidents et possède un angle d'ouverture dépendant de l'énergie des électrons. De plus, l'intensité du rayonnement n'est pas uniforme sur l'ensemble de la surface émissive, appelée tache focale.

Deux technologies de sources sont employées à Epure. Deux des trois machines produisent des photons X d'énergie maximale proche de 20 MeV en utilisant un accélérateur linéaire à induction (LIA, voir l'ARTICLE 3b p. 36). La troisième machine est basée sur un générateur de hautes puissances pulsées de type *inductive voltage adder* (IVA) qui polarise une diode avec une tension pouvant atteindre 8 MeV. Les électrons arrachés à la cathode et accélérés dans l'espace entre la cathode et l'anode, d'environ 10 cm, impactent cette dernière et produisent le flux X recherché.

Les accélérateurs linéaires à induction offrent des taches focales de petite taille (entre 1,5 et 3 mm) et un lobe resserré. Celui-ci doit être

FIGURE 3



→ Principe de l'émission de photons par freinage d'un électron (e<sup>-</sup>) lors de son interaction avec un atome (noyau et nuage électronique). Les photons émis ont des énergies différentes selon le ralentissement subi par l'électron.

particulièrement bien caractérisé, car son influence sur la mesure est notable. Ces machines demandent des réglages fins et complexes de leurs lignes accélératrices, mais, une fois maîtrisées, elles offrent une stabilité et une reproductibilité remarquables. La diode crée un champ de vue plus ouvert avec un lobe uniforme au détriment d'une tache focale un peu plus large et d'un fonctionnement moins reproductible. L'exploitation d'une diode nécessite plus de maintenance, il faut changer la diode et nettoyer son environnement après chaque flash.

Ainsi, les sources X exploitées sur Epure ont une tache focale comprise entre 1,5 et 5 mm et une dose de l'ordre de 3 à 5 grays. En modifiant les paramètres des machines, un compromis est retenu entre la dose et la

tache focale de la source pour une expérience donnée. En favorisant la dose, on dispose de plus de signal pour étudier un objet de masse surfacique plus élevée, alors qu'en favorisant la tache focale, on améliore la résolution de la chaîne radiographique.

L'exploitation d'une radiographie Epure nécessite de disposer de sources X parfaitement connues et reproductibles. Le fonctionnement des machines est ajusté pour s'adapter à l'ensemble des phénomènes hydrodynamiques de l'objet étudié. On réalise une série de flashes X de caractérisation (tache focale, lobe, mesure de dose, etc.) préalablement à l'expérience. La variabilité de fonctionnement des machines doit être déterminée afin de quantifier son impact sur l'incertitude expérimentale.

M. Wansek CEA - DAM, centre DAM Île-de-France

# Les détecteurs

# 2d

**Des détecteurs capables de produire des images numériques à partir de flux de particules 80 fois plus énergétiques que dans le médical et en un temps 1 million de fois plus rapide, voilà ce qu'ont développé des ingénieurs-chercheurs de l'équipe radiographie du CEA - DAM.**

Issus de technologies existantes dans le commerce, les capteurs utilisés dans les expériences sur Epure sont adaptés pour répondre aux enjeux spécifiques de l'installation. Ces détecteurs ont pour objectif de transformer le flux de particules incidentes issues des machines radiographiques en image numérique exploitable.

Alors que les détecteurs développés dans le monde médical sont capables de réaliser une image numérique d'un photon d'énergie de 50 keV, l'énergie moyenne des photons incidents lors des expériences de radiographie éclair est d'environ 4 MeV. Il faut donc utiliser des détecteurs dits à haut pouvoir d'arrêt afin que les photons incidents interagissent dans le milieu détecteur et que l'effet produit par cette interaction soit détecté. En plus de cela, les vitesses de déplacement de l'objet radiographié sont de l'ordre de plusieurs kilomètres par seconde et la durée d'irradiation, délivrée par les machines radiographiques, est inférieure à 100 nanosecondes, soit une performance 1 million de fois plus rapide que pour une imagerie médicale dont le temps d'exposition est de l'ordre de 0,1 seconde. Ainsi, les détecteurs doivent

avoir un temps d'intégration adapté à la durée d'irradiation tout en limitant le flou de bougé.

Afin de répondre à toutes ces exigences, nous avons développé deux détecteurs complémentaires, utilisés simultanément lors de chaque expérience. Le premier est constitué d'écrans radioluminescents à mémoire de dimensions 20 cm × 40 cm. Il s'agit d'un écran à base de phosphore qui a la capacité de stocker l'information créée par interaction rayonnement-matière, puis de la restituer par photostimulation lors de la lecture de l'écran par un scanner. Alors qu'il est constitué d'un seul écran radio dans le monde médical, le détecteur utilisé lors des expériences sur Epure, illustré sur la **FIGURE 1**, comporte quant à lui vingt écrans, permettant ainsi d'augmenter le rapport signal à bruit de l'image numérique finale. L'autre avantage de ce détecteur est sa bonne résolution spatiale qui permet d'observer des détails allant jusqu'à quelques centaines de micromètres, soit l'équivalent de quelques cheveux humains.

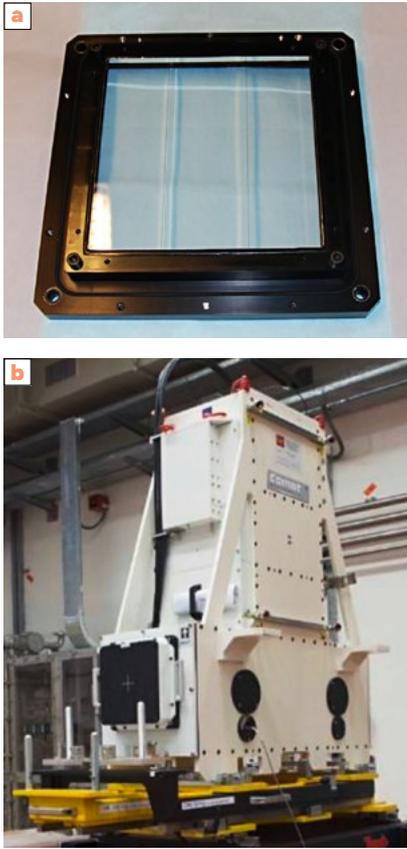
Le second détecteur utilisé en complément du premier est appelé une gamma-caméra. Ce détecteur est constitué de différents éléments qui permettent

FIGURE 1



→ [a] Photographie d'un empilement d'écrans radioluminescents à mémoire constitué d'une alternance d'écrans radio en blanc et de feuilles de tantale en noir, permettant d'augmenter le pouvoir d'arrêt du détecteur. [b] Photographie du détecteur constitué et utilisé lors des expérimentations sur l'installation Epure.

FIGURE 2



—> [a] Photographie d'un scintillateur constitué de trois blocs joints qui convertit les rayons X en photons visibles. [b] Photographie d'une gamma-caméra contenant un miroir, un objectif et une caméra CCD permettant de créer l'image numérique

de convertir les rayons X en une image numérique. La gamma-caméra est composée en face avant d'un scintillateur de 20 cm × 20 cm, qui convertit les rayons X en lumière visible. L'image lumineuse issue du scintillateur est acquise par une caméra CCD (*charge-coupled device*) au travers d'un miroir de renvoi et d'un objectif. Deux protections en plomb, un mur positionné le long de l'objectif et un cylindre encerclant la caméra CCD permettent de protéger la caméra et l'objectif des rayonnements diffusés (pour plus d'explications sur cette notion, voir l'ARTICLE 2b p. 27). Cette structure alourdie fait que l'ensemble mesure plus de 1 mètre et pèse près de 1 tonne (voir FIGURE 2); les protections sont néanmoins nécessaires pour un rendu exploitable de l'image numérique.

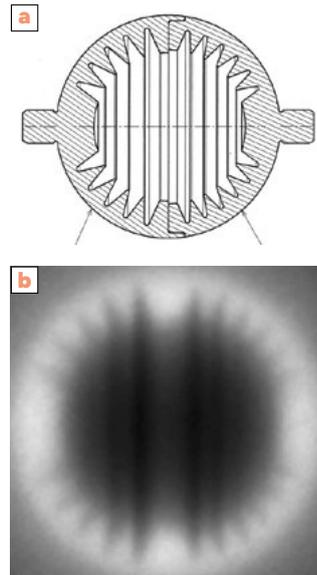
L'avantage principal de ce détecteur est sa bonne sensibilité, c'est-à-dire qu'il est capable de détecter un grand nombre de particules incidentes, proportionnellement au nombre de photons incidents délivrés par la machine radiographique. L'image réalisée par la gamma-caméra est disponible quasiment immédiatement après la réalisation de l'expérience.

Profitant de leurs caractéristiques complémentaires, ces deux détecteurs sont utilisés simultanément lors des expériences. Cette utilisation combinée permet aussi de pallier un éventuel défaut de fonctionnement d'un détecteur ou de l'autre lors de la réalisation de l'expérience.

Préalablement à la réalisation d'une expérience, les équipes réalisent des tests, en collaboration avec les responsables radiographiques, pour s'assurer que les machines et les détecteurs radiographiques fonctionnent correctement et de manière synchrone. Au cours de ces essais, un objet appelé maquette est testé, il est représentatif des matériaux utilisés et des détails observés lors des expériences. Au centre de cette maquette est placé un IQI (indicateur de qualité d'images) illustré sur la FIGURE 3 qui permet de s'assurer que les machines radiographiques et les caractéristiques techniques des détecteurs répondent aux exigences de conception de l'expérience, qui varie d'une expérience à l'autre.

Par améliorations successives, les détecteurs radiographiques sont de plus en plus performants. Ils évoluent conjointement avec les progrès des machines et de la chaîne radiographique et bénéficient des évolutions technologiques. Pour les besoins radiographiques futurs, les détecteurs font l'objet d'études de R&D afin d'améliorer continuellement leurs performances, notamment la résolution, la sensibilité et le rapport signal à bruit.

FIGURE 3



—> [a] Indicateur de qualité d'images de 2 cm de diamètre conçu pour tester, en amont d'une expérience, les machines et les détecteurs radiographiques. [b] Image de l'indicateur obtenue pour les détecteurs radiographiques.

C. Vermare CEA - DAM, centre du Cesta  
R. Maissonny CEA - DAM, centre de Gramat

# Des électrons pour des photons

3a

Un flash de rayons X peut sonder la matière et permettre de réaliser une radiographie éclair. Comment produire ces photons si particuliers et comment créer cette impulsion brève et intense ? Par l'intermédiaire de la production d'électrons.

Les électrons peuvent, en pénétrant dans la matière, y être freinés et convertir une partie de leur énergie en rayonnement X (voir figure 3 de l'ARTICLE 2c p. 29). C'est le rayonnement dit de *Bremsstrahlung*, terme allemand signifiant rayonnement de freinage. Le rayonnement X qui est produit possède les caractéristiques suivantes :

- son spectre est large et continu de zéro jusqu'à l'énergie des électrons incidents (FIGURE 1);
- son intensité, c'est-à-dire le nombre de photons par unité de temps, est proportionnelle au courant d'électrons;
- sa directivité globale est centrée sur la direction incidente du faisceau d'électrons;
- la dimension de la source est liée à la zone d'interaction des électrons avec la matière;
- la durée d'émission est égale à la durée du courant d'électrons.

Les besoins des utilisateurs de l'installation Epure portent sur les rayons X; pour les produire, les caractéristiques de l'impulsion d'électrons sont calculées avec des modélisations numériques d'interaction rayonnement-matière. L'énergie des électrons lors de l'interaction avec la cible (matériau de conversion) doit être supérieure à quelques millions d'électronvolts (quelques MeV), le courant de l'ordre de plusieurs kiloampères et la durée inférieure à un dixième de microseconde (ou 100 ns). Le besoin de disposer d'un flux de rayons X, tel que souhaité, requiert la maîtrise de la bouffée d'électrons. Les électrons sont des particules chargées qui ont l'avantage de pouvoir être accélérées ou déviées par l'action de champs électriques et magnétiques.

Dans cette gamme de performances, deux types de grands instruments de physique sont utilisés : les accélérateurs linéaires à induction et les

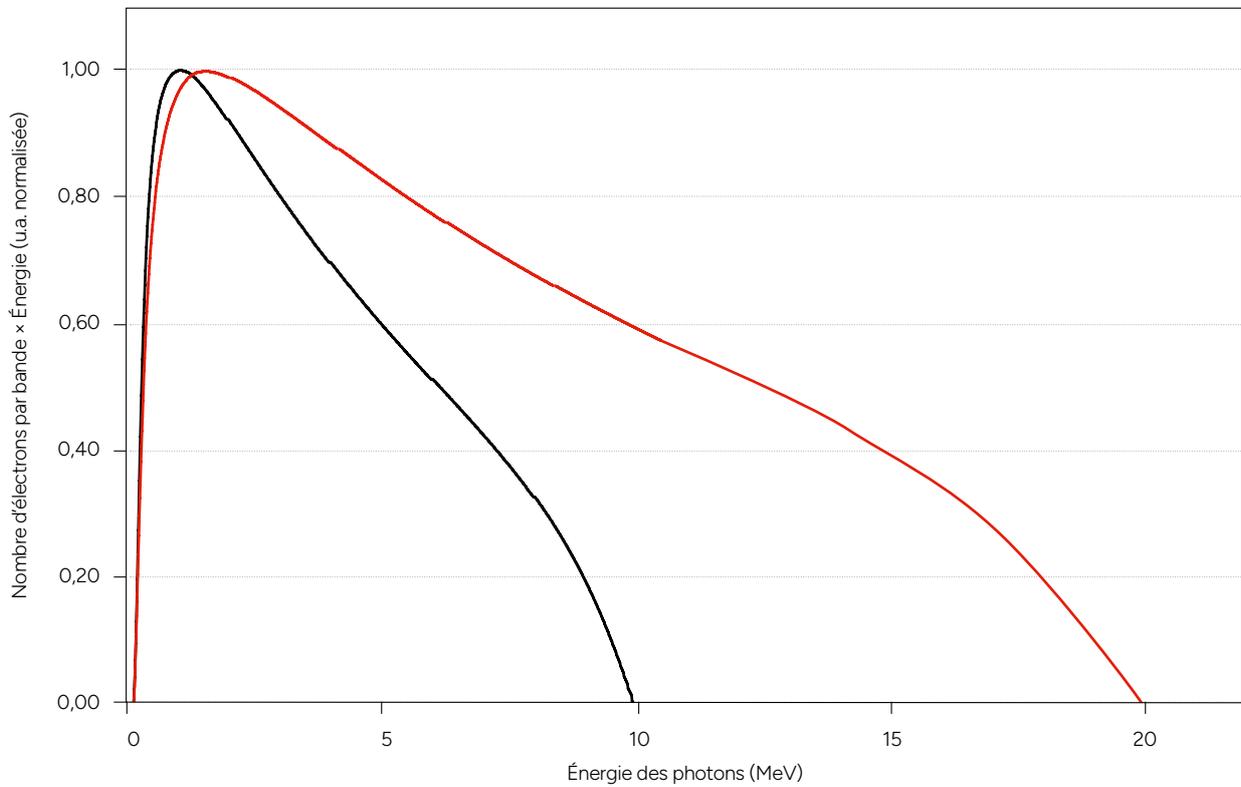
générateurs de très hautes puissances pulsées. Le principe général consiste toujours à produire un faisceau (les électrons sont arrachés à la matière), à l'accélérer à l'aide de champs électriques intenses, puis à freiner les électrons qui le constituent dans un matériau, dont le numéro atomique est élevé, sur la plus petite zone spatiale possible.

Ces deux types de technologies se différencient par le rapport de l'énergie au courant. L'intensité de rayonnement X produit lors de l'interaction est directement proportionnelle au courant du faisceau d'électrons et dépend quasiment du cube de leur énergie. Ainsi, tandis que les accélérateurs (voir l'ARTICLE 3b p. 36) privilégient une montée en énergie (accélération) importante par rapport au nombre d'électrons (20 MeV, 2 kA), les générateurs, eux, vont avantager des courants intenses et des énergies électroniques plus modérées (8 MeV, 200 kA).

Quelle que soit la technologie mise en œuvre, la maîtrise de la dynamique des faisceaux d'électrons au sein de ces grands instruments est cruciale pour leur conception. La dynamique du faisceau est un thème de la physique qui combine notamment l'électromagnétisme, la relativité ainsi que la physique des plasmas. Elle étudie le mouvement d'un ensemble de particules chargées dans une succession de champs électriques et magnétiques.

Focalisons-nous sur ces forces électromagnétiques et les phénomènes collectifs au sein d'un tel ensemble d'électrons. Des champs électriques permettent d'extraire les électrons d'une surface appelée cathode, puis de les accélérer. Les champs magnétiques sont classiquement utilisés pour agir sur la trajectoire des électrons, surtout si ces derniers parcourent des distances importantes. Ces champs sont souvent qualifiés d'externes, ils sont générés de manière maîtrisée par l'opérateur.

FIGURE 1



→ Spectre photonique X normalisé pour deux énergies de photons incidents : 10 et 20 MeV. L'axe des ordonnées correspond au nombre de photons multiplié par l'énergie. Les courbes noire et rouge correspondent à un électron incident d'énergie 10 MeV et 20 MeV respectivement.

Plus délicate est la maîtrise des forces internes au faisceau, provenant d'effets collectifs. Dans ces faisceaux, la densité des électrons et leur vitesse sont telles que des champs électromagnétiques intenses sont produits et interagissent, en retour, sur la densité et les vitesses. Ces champs, qualifiés d'auto-induits, ne peuvent pas être négligés. Ils impactent les trajectoires

des électrons sans contrôle externe. À ces phénomènes délicats à contrôler s'ajoutent des instabilités qui viennent complexifier les forces agissant sur les électrons. Leur compréhension fait donc l'objet d'un soin particulier. Elles représentent aujourd'hui l'un des facteurs les plus limitants sur les performances des accélérateurs et des générateurs d'Epure.

B. Cassany, P. Soutenain CEA - DAM, centre du Cesta

# Les accélérateurs linéaires à induction

3b

Les machines des axes 1 et 3 de l'installation Epure sont des accélérateurs spécifiques à la radiographie éclair ; ce sont des accélérateurs linéaires à induction (LIA pour *linear induction accelerator*), construits par la France (CEA - DAM). Détaillons leur fonctionnement.

Les accélérateurs linéaires à induction produisent un faisceau d'électrons de haute énergie qui génère des rayons X par l'interaction des électrons avec une cible de matière dense, par l'effet du rayonnement de freinage. Les photos de la **FIGURE 1** illustrent les deux halls principaux hébergeant l'axe 3 d'Epure, mis en exploitation à la fin de l'année 2023.

## Points cruciaux pour le fonctionnement des machines LIA

Une source de rayonnement X produisant la tache focale la plus petite possible requiert une surface de focalisation du faisceau d'électrons également la plus petite possible. De manière simplifiée, seuls des électrons qui se déplacent sur des trajectoires parallèles avec la même énergie peuvent être

focalisés par un solénoïde magnétique en un point donné. Cela peut être comparé en optique à la focalisation d'un rayon lumineux monochromatique par une lentille ; la **FIGURE 2** illustre cette analogie.

Ce point est crucial pour la performance d'une source radiographique. Il convient donc de générer un faisceau ordonné du point de vue de la cinématique et de l'énergie des électrons et de le transporter sans le dégrader depuis sa zone de création dans la diode de l'injecteur jusqu'à la cible de conversion en rayons X.

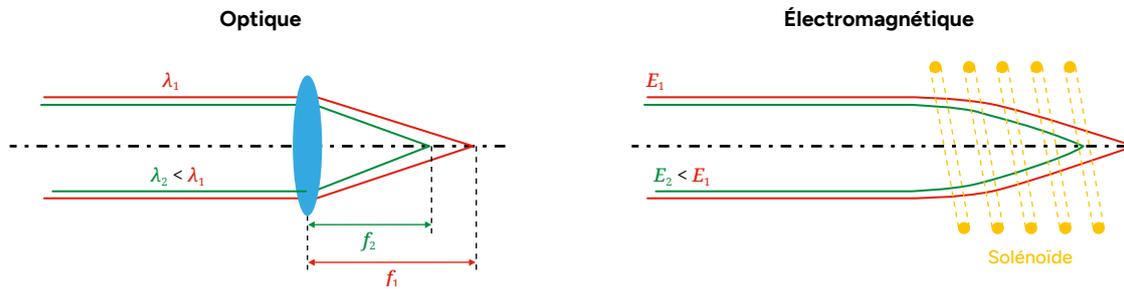
La première cause de dégradation de la qualité d'un faisceau d'électrons provient de leur vitesse transverse, qu'il convient de rendre négligeable par rapport à leur vitesse longitudinale. Cela est obtenu en conférant aux électrons la plus grande vitesse longitudinale dès leur extraction dans la diode.

FIGURE 1



→ Photographies de [a] l'accélérateur de l'axe 3 d'Epure composé de l'injecteur et des 64 cellules accélératrices qui sont alimentées par [b] 16 générateurs à haute tension au moyen de 128 câbles à haute tension (rouge).

FIGURE 2



—> Analogie entre l'optique et l'électromagnétisme concernant la focalisation d'un rayon lumineux et celle d'un faisceau d'électrons :  $\lambda_1 > \lambda_2$  sont des longueurs d'onde différentes,  $E_1 > E_2$  sont les énergies d'électrons différentes,  $f_1$  et  $f_2$ , distances focales respectives de  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ .

Finalement, il est important de préciser qu'un faisceau d'électrons ne peut être transporté, sur une longue distance, que dans un environnement sous vide poussé ( $10^{-10}$  bar). Cela permet de minimiser les interactions avec des particules résiduelles.

### Conception d'une machine de radiographie éclair : prérequis

Plusieurs objectifs sont à considérer pour concevoir une telle machine :

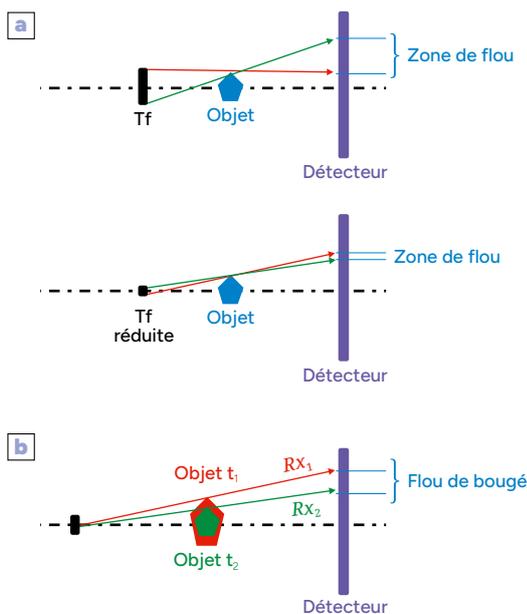
- 1. La tache focale Tf doit être la plus petite possible pour limiter les flous géométriques. Aussi, le faisceau

d'électrons doit être focalisé sur une surface la plus petite possible (millimétrique). La **FIGURE 3a** illustre le lien entre la taille de la tache focale et la zone floue sur le détecteur radiographique.

- 2. Pour former une image contrastée et non bruitée sur le détecteur, la dose, assimilable à la quantité de rayons X, ainsi que leur énergie doivent être élevées du fait des densités importantes des matériaux à traverser.
- 3. En raison des vitesses de déformation des objets étudiés très élevées, le temps de pose doit être bref, d'où la terminologie de radiographie éclair, comme le montre la **FIGURE 3b**.

Ces paramètres sont reliés par la relation empirique suivante :  $\text{Dose X} \propto E_e^{2.7} \times I \times T_p$ , où  $E_e$  est l'énergie des électrons et I l'intensité du courant du faisceau d'électrons. La dose et le temps de pose étant fixés pour les besoins de la radiographie, cela conduit à la recherche d'un compromis sur le courant I et l'énergie  $E_e$ , dont les valeurs optimales sont respectivement de l'ordre de 2 kA et 20 MeV.

FIGURE 3



—> [a] Illustration de l'influence de la taille de la tache focale sur la qualité d'une image radiographique. [b] Illustration du flou de bougé dû au mouvement de l'objet.

### Les composants d'un LIA : de l'injecteur d'électrons à la cible de conversion

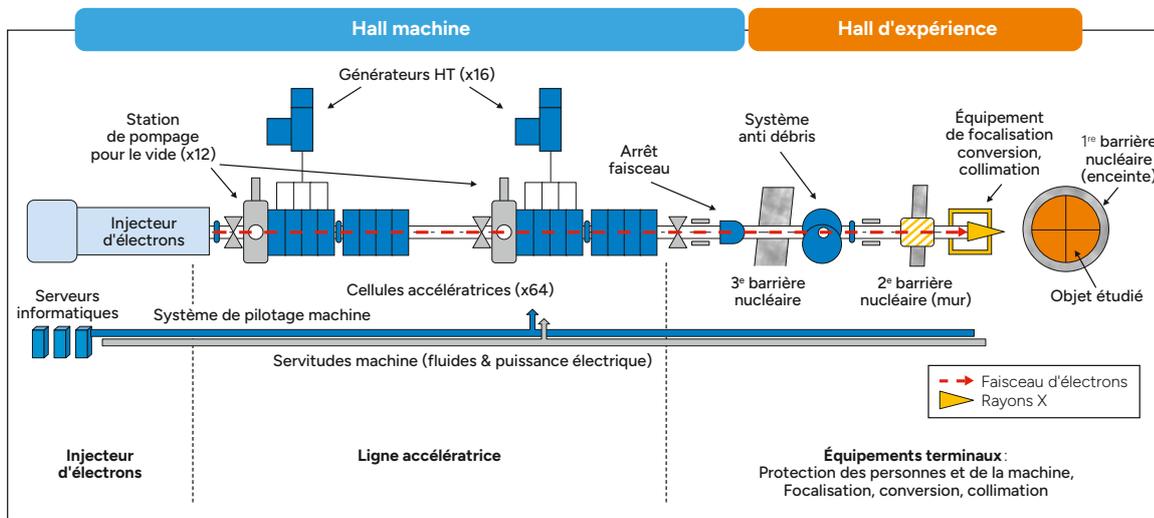
La machine est composée de trois sous-ensembles principaux, ce qu'illustre le schéma présenté sur la **FIGURE 4** :

- l'injecteur qui génère le faisceau d'électrons ;
- la ligne accélératrice qui accélère le faisceau tout en le guidant ;
- la partie terminale, qui comprend notamment les équipements finaux pour la focalisation, la conversion et la collimation.

#### L'injecteur d'électrons

Le premier élément de la machine est l'injecteur, qui génère un faisceau d'électrons d'une intensité de 2 kA avec une durée d'impulsion de l'ordre de 100 ns. Ici aussi les choix de conception de l'injecteur résultent d'un compromis. L'énergie des électrons en sortie d'injecteur est limitée à 4 MeV du fait des contraintes

FIGURE 4



→ Les trois sous-ensembles principaux d'un LIA : l'injecteur du faisceau d'électrons, la ligne accélératrice composée de 64 cellules, la partie terminale comprenant notamment l'équipement de focalisation, de conversion et de collimation.

technologiques et de la difficulté à maîtriser les phénomènes de claquage à haute tension : 4 millions de volts sont appliqués entre l'anode et la cathode de la diode.

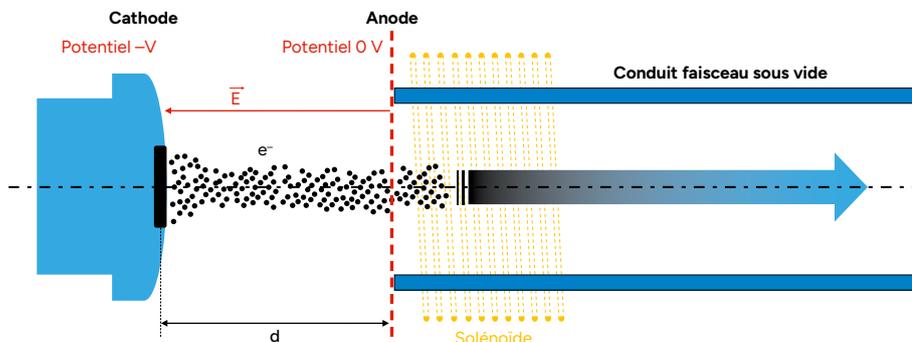
L'injecteur est lui-même composé des trois sous-ensembles suivants :

- Le générateur primaire : ce générateur impulsionnel stocke de l'énergie électrique en chargeant durant 1 minute des condensateurs à haute tension à environ 100 kV, et la restitue sous forme impulsionnelle en un temps très bref (une microseconde environ) grâce à un interrupteur rapide. Cette impulsion est appliquée au circuit primaire d'un transformateur. La tension de sortie au

circuit secondaire atteint 1,5 MV. L'énergie étant conservée, la puissance de l'impulsion de sortie est amplifiée dans le rapport des durées des charge et décharge (1 min contre 1  $\mu$ s, soit un gain de  $6 \cdot 10^6$ ).

- Les lignes de mise en forme : cette impulsion de 1,5 MV est appliquée à une succession de tronçons de lignes coaxiales, d'impédances croissantes, ce qui permet une élévation de tension à 4 MV qui est appliquée au dernier élément de l'injecteur, la diode, dans laquelle est formé le faisceau d'électrons.
- Schématisée sur la FIGURE 5, la diode est composée d'une cathode constituée d'un matériau de

FIGURE 5



→ Schéma de la diode de l'injecteur intégrant une cathode (comportant le velours) au potentiel  $-V = 4 MV$ , une anode au potentiel nul, un solénoïde d'extraction.

type velours et d'une anode, entre lesquelles l'impulsion de tension est appliquée. Le champ électrique généré arrache des électrons au velours et les accélère jusqu'à une énergie d'environ 4 MeV en sortie d'injecteur.

Les électrons qui composent le faisceau ont naturellement tendance à se repousser entre eux. Ces forces répulsives conduisent le faisceau à diverger. Cette divergence est compensée par l'effet d'un champ magnétique produit par un solénoïde.

### La ligne accélératrice

Dans cette deuxième partie de la machine, la plus longue (près de 40 m), le faisceau d'électrons est accéléré jusqu'à l'énergie recherchée d'environ 20 MeV. Il est transporté sous vide dans les cellules accélératrices jusqu'à la partie terminale où se situe la cible de conversion. Cette ligne est constituée de 64 cellules accélératrices à induction, alimentées par des générateurs électriques à haute tension, illustrés sur la **FIGURE 6**. Huit stations de pompage maintiennent le vide dans le conduit du faisceau.

Les cellules à induction sont constituées d'une anode et d'une cathode entre lesquelles un champ électrique est appliqué, délivrant au faisceau d'électrons une énergie complémentaire de 250 keV, soit au total  $64 \times 250 \text{ keV} = 16 \text{ MeV}$ . Ainsi, le faisceau d'électrons en fin de ligne accélératrice aura une énergie d'environ 20 MeV (4 MeV en sortie d'injecteur + 16 MeV le long de la ligne accélératrice). Chaque

cellule comprend également un solénoïde centré sur l'axe de propagation du faisceau, qui génère le champ magnétique de guidage. Finalement, chaque cellule est équipée de correcteurs de trajectoire.

Les 16 générateurs à haute tension disposés dans le hall des générateurs fournissent les impulsions de tension de 250 kV. Ces impulsions, d'une durée d'environ 100 ns, sont acheminées jusqu'aux cellules par les câbles haute tension.

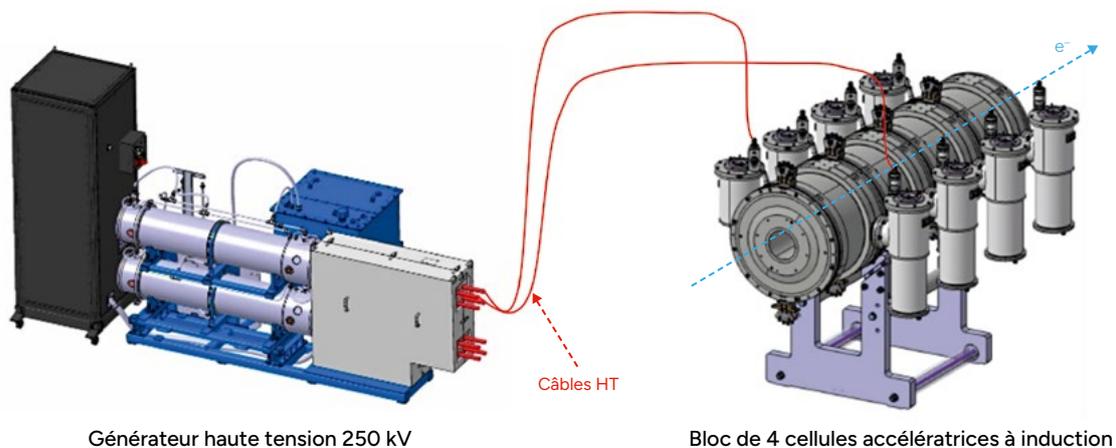
### La partie terminale

Ce troisième sous-ensemble de la machine comprend l'espace de glissement final (EGF) dont l'objectif est d'acheminer le faisceau d'électrons vers l'équipement de focalisation, de conversion et de collimation (EFCC). Tout au long de l'EGF sont répartis des solénoïdes de guidage qui permettent d'éviter la divergence du faisceau, le dispositif d'arrêt du faisceau, le système anti-débris et une station de pompage.

L'espace de glissement final est constitué des composants suivants :

- Dispositif d'arrêt faisceau : ce dispositif est mis en œuvre en sortie de la ligne accélératrice. Il permet de stopper le faisceau d'électrons dans le hall machine, qui héberge la ligne accélératrice. Cette configuration particulière, dévolue aux phases de réglage de la ligne accélératrice, autorise la présence de personnels en toute sécurité dans les locaux adjacents.
- Système anti-débris (voir l'**ARTICLE 3d** p. 44) : ce système a une fonction de protection de la machine.

FIGURE 6



—> Générateur alimentant un bloc de quatre cellules accélératrices par les câbles à haute tension ; le faisceau d'électrons est représenté par la flèche bleue.

Lors de la conversion du faisceau d'électrons en rayons X, la cible de conversion est vaporisée et de fines particules remontent dans le conduit faisceau. Afin d'éviter que ces particules ne remontent trop loin, le système anti-débris permet d'obstruer le conduit immédiatement après le passage du faisceau et d'arrêter les débris indésirables.

- Bobines de guidages: ces solénoïdes, répartis sur toute la longueur de l'espace de glissement final, ont une fonction de guidage du faisceau et de conservation de ses propriétés jusqu'à l'équipement final.

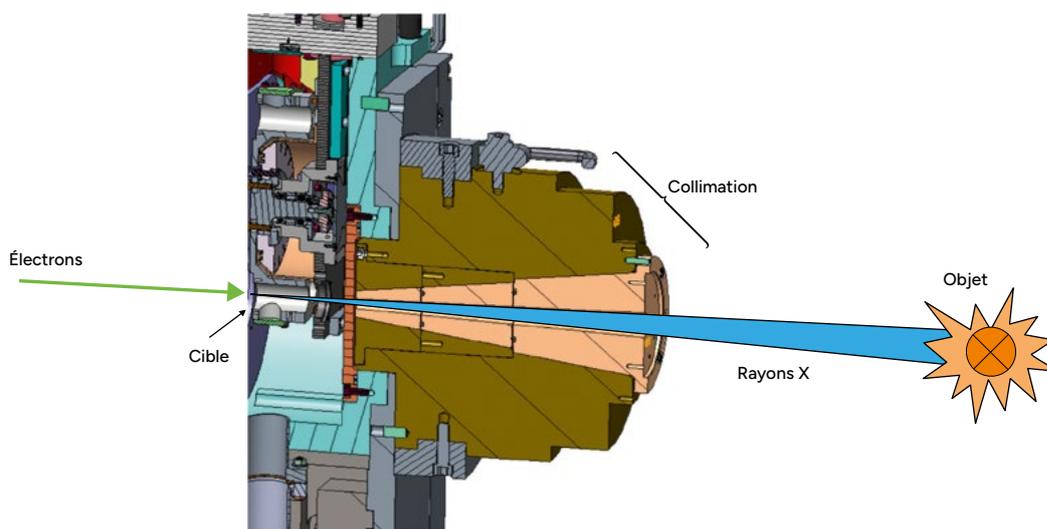
Les trois fonctions de l'équipement de focalisation, de conversion et de collimation sont:

- La focalisation: à la fin de son parcours dans l'espace de glissement final, le faisceau d'électrons possède un diamètre de plusieurs centimètres. Dans le but de minimiser la tache focale, le

faisceau est focalisé par un champ magnétique intense.

- La conversion: les machines de radiographie éclair utilisées à Epure génèrent des rayons X issus de l'interaction entre un faisceau d'électrons à haute énergie et une cible de conversion constituée de matière dense. Ce phénomène est appelé rayonnement de freinage ou effet *Bremsstrahlung*.
- La collimation: lors de l'interaction entre le faisceau et la cible, un lobe de rayonnement X est émis dans toutes les directions de l'espace. Il convient de mettre en place un système de filtrage spatial pour ne conserver que les rayons X émis en direction de l'objet étudié et protéger ainsi des matériels dans le hall d'expérience, tels que les matériels de mesure, les matériels électroniques de pilotage d'équipements, etc. La **FIGURE 7** illustre l'effet de la collimation.

FIGURE 7



—> Collimation du lobe de rayons X assurée par des pièces en tungstène: une collimation primaire (**marron foncé**) et une collimation secondaire (**marron clair**) constituée par trois tronçons coniques changeables (réglage de l'ouverture de l'angle).

B. Cadilhon, B. Cassany, C. Fourment, C. Vermare CEA - DAM, centre du Cesta

# Caractérisation du faisceau électronique

3C

Pour mesurer des millions de volts, des centaines de milliers d'ampères et observer la position et la taille du faisceau d'électrons, quelles sont les techniques utilisées ?

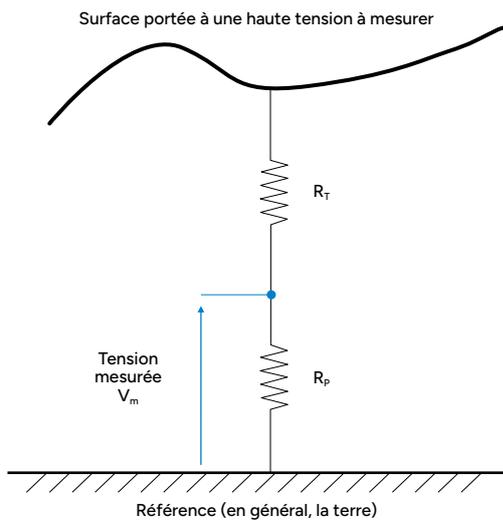
Les machines de radiographie éclair manipulent des hautes puissances pulsées. Dans des temps brefs, les tensions et les courants atteignent des amplitudes exceptionnelles. La puissance à mesurer dépasse la dizaine de gigawatts, soit des millions de volts et des milliers d'ampères simultanément. Des capteurs sont développés spécifiquement pour cette application. Contrairement aux mesures élémentaires effectuées avec un multimètre qui ne nécessite que l'application de la loi d'Ohm, le

fonctionnement de ces capteurs fait appel aux équations de Maxwell.

## Mesures de tension

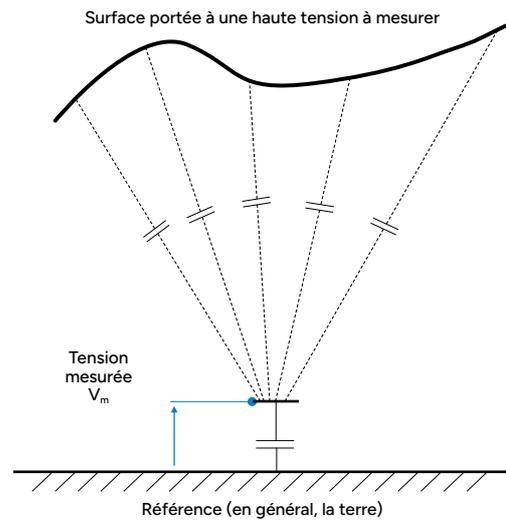
Pour les mesures de tension, lorsque le conducteur dont on veut mesurer le potentiel est physiquement accessible, on utilise le principe classique d'une division résistive (FIGURE 1). Ce type de capteur est intrusif, car il nécessite un contact sur l'électrode haute tension pour

FIGURE 1



→ Circuit électrique équivalent d'un diviseur résistif.  $V_m = V_{HT} \times R_p / (R_p + R_t)$ , typiquement  $R_t = 10^4 R_p$ , donc  $V_m \approx V_{HT} \times R_p / R_t$ . Par exemple, la mesure d'une tension de 1 million de volts sera ramenée à 100 volts et sera donc compatible avec les appareils de mesure classiques comme les oscilloscopes.

FIGURE 2



→ Circuit électrique équivalent à un diviseur capacitif. Le principe de fonctionnement est identique à celui d'un diviseur résistif. Le principal intérêt réside dans l'utilisation des capacités parasites (en pointillés) qui permettent une mesure sans contact avec la haute tension.

connecter la résistance  $R_s$ . Le rapport de division est fixé par les valeurs de  $R_p$  et  $R_s$ . Ce type de capteur souffre en général de la présence d'éléments parasites inductifs et capacitifs qui, s'ils ne sont pas pris en compte, limitent la bande passante à quelques mégahertz.

Lorsque le conducteur n'est pas accessible, on préfère un autre type de capteurs de type diviseur capacitif (FIGURE 2). Outre le fait qu'il permet d'atteindre des bandes passantes de plusieurs gigahertz, il présente l'avantage d'être non intrusif. Dans ce cas, les résistances sont remplacées par des condensateurs avec la particularité que le condensateur n'est pas un composant discret, mais la capacité parasite entre des conducteurs. La sensibilité d'un tel capteur dépend alors de son environnement géométrique et de la permittivité du milieu. Il doit donc être impérativement étalonné *in situ*.

### Mesures de courant

Pour les mesures de courant impulsionnel intense, le principe couramment utilisé consiste à mesurer la variation de flux créée par le passage du courant (FIGURE 3). C'est aussi un capteur non intrusif qui s'apparente aux pinces ampérométriques utilisées en électricité classique.

Ce principe s'applique aussi bien à un conducteur qu'à un faisceau de particules chargées. En pratique, on place un circuit de surface effective  $A_{eff}$  qui peut prendre la forme d'une ou plusieurs spires autour du courant à mesurer. La tension induite générée aux bornes du capteur vaut  $V_m(t) = -A_{eff} \cdot dB/dt$ . La grandeur  $B$  représente le champ magnétique induit par

le courant à mesurer. Ce champ magnétique étant proportionnel au courant, le capteur va donner une tension  $V_m$  proportionnelle à la dérivée du courant qu'il suffira d'intégrer. Le réglage de la sensibilité se fait en choisissant une surface effective plus ou moins grande. En prenant des précautions particulières (faible surface effective), la bande passante peut dépasser le gigahertz.

### Diagnostics optiques

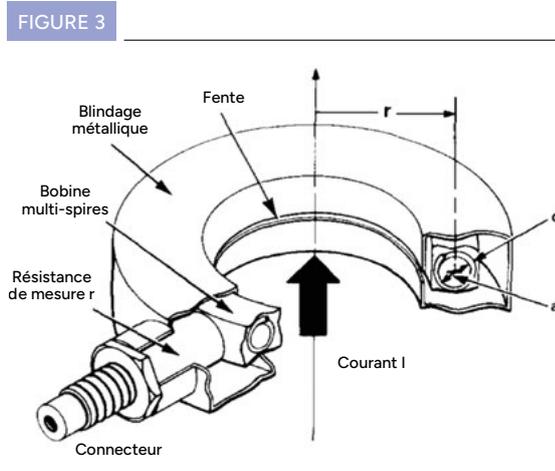
Mesurer la taille et la position du faisceau d'électrons dans l'accélérateur est nécessaire pour maîtriser les performances d'un accélérateur de radiographie éclair. Quelles traces lumineuses peuvent-elles témoigner du passage d'électrons? Quelles informations portent-elles?

Lorsqu'un électron interagit avec la matière, un des effets de sa charge est une polarisation locale à chaque instant des atomes ou molécules autour de lui. La relaxation de ces polarisations, après son passage, génère un champ nul à longue distance du fait de la symétrie des rayonnements émis au voisinage de l'électron. Deux situations particulières engendrent une organisation dans laquelle ces rayonnements ont une cohérence qui permet leur propagation à grande distance. Une direction d'observation le long de laquelle ils vibrent à l'unisson.

La première situation est le passage d'une interface entre deux milieux (par exemple l'interface vide-matière). La différence de leurs propriétés diélectriques rompt la symétrie du problème qui annule le champ global rayonné, d'où la production de lumière dans des directions privilégiées. C'est le rayonnement de transition optique.

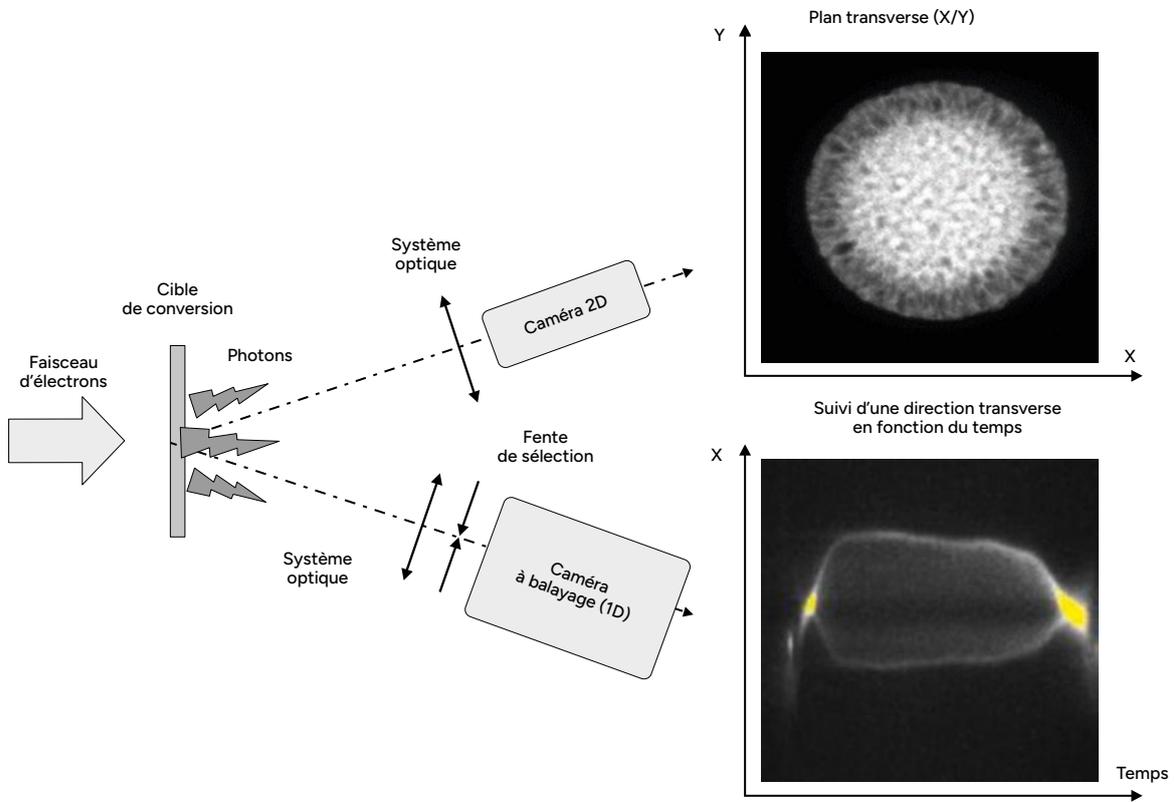
Une autre situation est le passage du « mur du son » optique, qui génère le rayonnement dit de Cherenkov donnant cette lueur bleue aux piscines de stockage de combustible nucléaire. La vitesse de l'électron étant supérieure à celle de la propagation de la lumière dans le milieu, la symétrie des rayonnements de relaxation n'est plus respectée. Telle la vague d'étrave du bateau, une onde constructive se propage et est visible à grande distance. L'angle entre la direction de propagation de l'électron initial et cette onde dépend simplement de la différence de vitesse. Pour observer ce rayonnement, le matériau du radiateur doit être toutefois transparent.

Une propriété intéressante de ces mécanismes est que l'intensité du rayonnement produit est directement proportionnelle à la quantité d'électrons du faisceau. Ainsi, l'image produite est en première approximation une image de la densité de courant du faisceau au niveau du radiateur.



→ Vue schématique d'un capteur de courant de type bobine de Rogowski.

FIGURE 4



—> Schéma de deux axes de mesure optique exploitant deux types de caméras : une caméra 2D capturant une image du faisceau dans le plan transverse de sa propagation (X-Y) avec un temps de pose donné, et une caméra à balayage de fente qui enregistre une dimension spatiale (X) en fonction du temps.

Pour constituer un système de mesure, ces rayonnements doivent être collectés et imagés. Pour la partie visible du spectre électromagnétique, des optiques traditionnelles sont utilisées. Par contre, le flux de photons pouvant être réduit et bref, des caméras munies d'un intensificateur de lumière avec des temps de pose de l'ordre de la nanoseconde sont utilisées. Les expérimentateurs d'Epure utilisent deux types de caméras (FIGURE 4) : des caméras dont le capteur collecte une image en deux dimensions d'espace (comme la photographie commune), ou des caméras à balayage de fente qui prennent une image avec une dimension spatiale et la dimension temporelle.

Ces deux types de caméras permettent une très bonne résolution spatiale, mais aussi temporelle. Ils sont couramment utilisés sur les deux accélérateurs linéaires à induction des axes 1 et 3 pour mesurer la position et la forme du faisceau au cours d'une impulsion unique. Cependant, le rayonnement observé est produit par des mécanismes physiques différents selon les conditions de l'interaction faisceau-radiateur.

Dans la ligne accélératrice des accélérateurs linéaires à induction, le faisceau électronique n'est

pas focalisé et sa densité de courant est relativement modérée. Le radiateur constitué par une feuille très mince (quelques micromètres d'épaisseur) n'est pas significativement altéré lors de l'interaction. *Contrairement*, à l'autre extrémité de l'accélérateur, le faisceau d'électrons est focalisé et la température du radiateur s'élève considérablement à l'endroit du foyer électronique pour atteindre une dizaine de milliers de degrés. Même si la matière n'a pas le temps de se déplacer pendant la durée d'une impulsion, à cette température, les principes d'émission décrits sont modifiés. La cible émet alors principalement un rayonnement optique thermique (de type corps noir). Contrairement aux deux mécanismes décrits précédemment, l'intensité du rayonnement émis d'une zone de l'image n'est pas directement proportionnelle au nombre d'électrons incidents sur cette zone. En imageant le rayonnement thermique issu de la cible de conversion X, les exploitants ont néanmoins une estimation de la taille, de la position et de la forme du foyer électronique lors de l'ultime interaction du faisceau.

C. Vermare CEA - DAM, centre du Cesta

# Systeme anti-débris

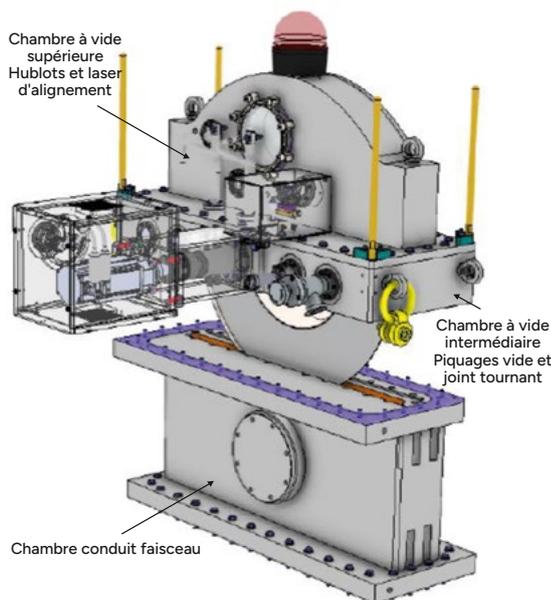
# 3d

Un obturateur mécanique rotatif pour des débris de métaux en fusion.

Le faisceau d'électrons impactant la cible de conversion (voir l'ARTICLE 2c p. 29) provoque sa destruction. La densité d'énergie déposée est telle que la matière est vaporisée et partiellement transformée en plasma. Alors, comment protéger les organes sensibles de l'accélérateur de ces débris, gouttelettes et particules gazeuses de matériau remontant à grande vitesse (à quelques kilomètres par seconde)? Quel principe utiliser pour obturer le conduit sous vide en quelques millisecondes?

Pour répondre à ce besoin unique, nous avons développé un système mécanique basé sur des disques de grand diamètre (> 1 mètre) tournant à haute vitesse (jusqu'à 6000 tours par minute). La FIGURE 1 présente

FIGURE 1



→ Représentation 3D de la partie supérieure du système anti-débris.

FIGURE 2



→ Photographie du système anti-débris déployé sur l'accélérateur du troisième axe radiographique d'Epure.

une vue 3D du système et la FIGURE 2 une photo de son intégration dans l'installation.

Chaque disque doit être percé pour laisser passer le faisceau d'électrons, être parfaitement synchronisé (dizaine de microsecondes) et donc tourner à une vitesse stabilisée sous vide ( $< 10^{-8}$  bar). La solution retenue utilise un disque très fin (1 mm) dans une nuance de titane résistante; les forces en périphérie sont telles qu'elles conduisent à l'arrachement de la matière du fait de la force centrifuge (voir ENCADRÉ 1). La rotation est assurée par un arbre sur roulement

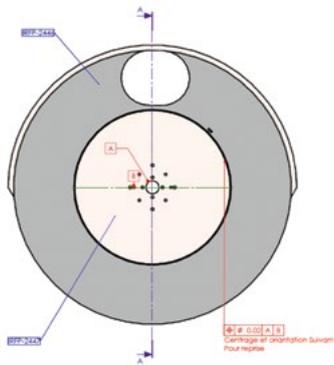
**ENCADRÉ 1**

**Les efforts appliqués sur le matériau des disques**

Le disque a une ouverture qui laisse passer le faisceau. Pour équilibrer le disque et renforcer le matériau en périphérie, une excroissance du disque est placée dans le secteur angulaire de l'ouverture (FIGURE E1-1). Un résultat de modélisation numérique des déformations subies par le disque en rotation (6000 tr/min) est visible sur la FIGURE E1-2.

Les pressions en jeu imposent l'utilisation d'une nuance particulière de titane pour garantir l'intégrité du disque.

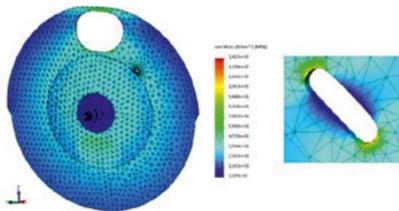
FIGURE E1-1



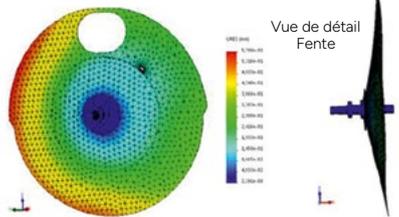
→ Plan (vue de face) d'un disque du système anti-débris.

FIGURE E1-2

**a** Contrainte de Von Mises Max / 6000 tr/min - 142 MPa



**b** Flèche Max / 6000 tr/min - 0,58 mm



→ Résultats de modélisation numérique des efforts et déformations induits sur le disque lors de sa rotation à 6000 tr/min. **[a]** Carte des valeurs de contrainte de Von Mises Max avec zoom sur l'ouverture nécessaire pour le capteur optique. **[b]** Carte des déplacements et vue transverse de la déformation du disque (amplifiée, valeur maximale de 0,58 mm).

à billes. Le moteur ne pouvant être placé sous vide, un roulement dit ferrofluidique (voir ENCADRÉ 2) assure l'étanchéité entre le volume sous vide et l'extérieur à la pression atmosphérique.

Après un tour, l'ouverture du disque est à nouveau en coïncidence avec le tube à obturer et cela limite l'efficacité. Pour retarder le temps de coïncidence, un autre disque, tournant à une vitesse légèrement différente, est utilisé en série sur la ligne. Grâce à la stabilisation de la rotation de chaque disque, il est possible d'ajouter autant de disques que nécessaire.

Reste une difficulté: les rotations doivent être stabilisées, mais également synchronisées sur une horloge (série régulière de «tops»). Leur phase doit être parfaitement calée alors que les disques sont lancés à grande vitesse. Le CEA-DAM a développé un organe de pilotage d'un moteur électrique qui assure qu'à chaque «top» la position angulaire du disque est identique. En utilisant un tel équipement sur chaque disque, ils tournent au rythme des horloges temporelles qui leur sont attribuées.

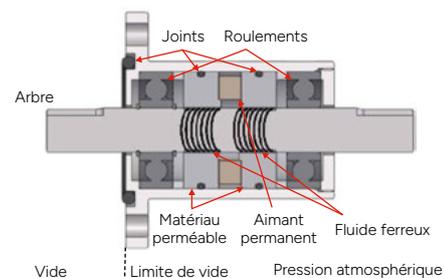
Ainsi, sur l'installation Epure, quatre disques sont activés: une paire pour chaque accélérateur de radiographie. Ils protègent efficacement les parties sensibles de la remontée des débris, projetés à grande vitesse, provenant de la pulvérisation de la cible à chaque flash.

**ENCADRÉ 2**

**Schéma de principe commenté d'un roulement ferrofluidique**

Un fluide ferrofluidique (chargé en particules sensibles au champ magnétique) est emprisonné entre l'arbre et un palier poreux par les lignes de champ magnétique créées par un aimant permanent. La présence stabilisée de cette couche de fluide assure l'étanchéité entre le volume sous vide et l'air ambiant. La FIGURE E2 est un schéma de principe d'un roulement ferrofluidique et de ses principaux constituants.

FIGURE E2



→ Schéma de principe d'un roulement ferrofluidique.





# focus #09

**ACTUALITÉS  
SCIENTIFIQUES**  
À LA DIRECTION  
DES APPLICATIONS  
MILITAIRES



cea

**OCTOBRE 2025**  
[WWW-DAM.CEA.FR](http://WWW-DAM.CEA.FR)