

LECI

DÉPARTEMENT
DES MATÉRIAUX POUR
LE NUCLÉAIRE

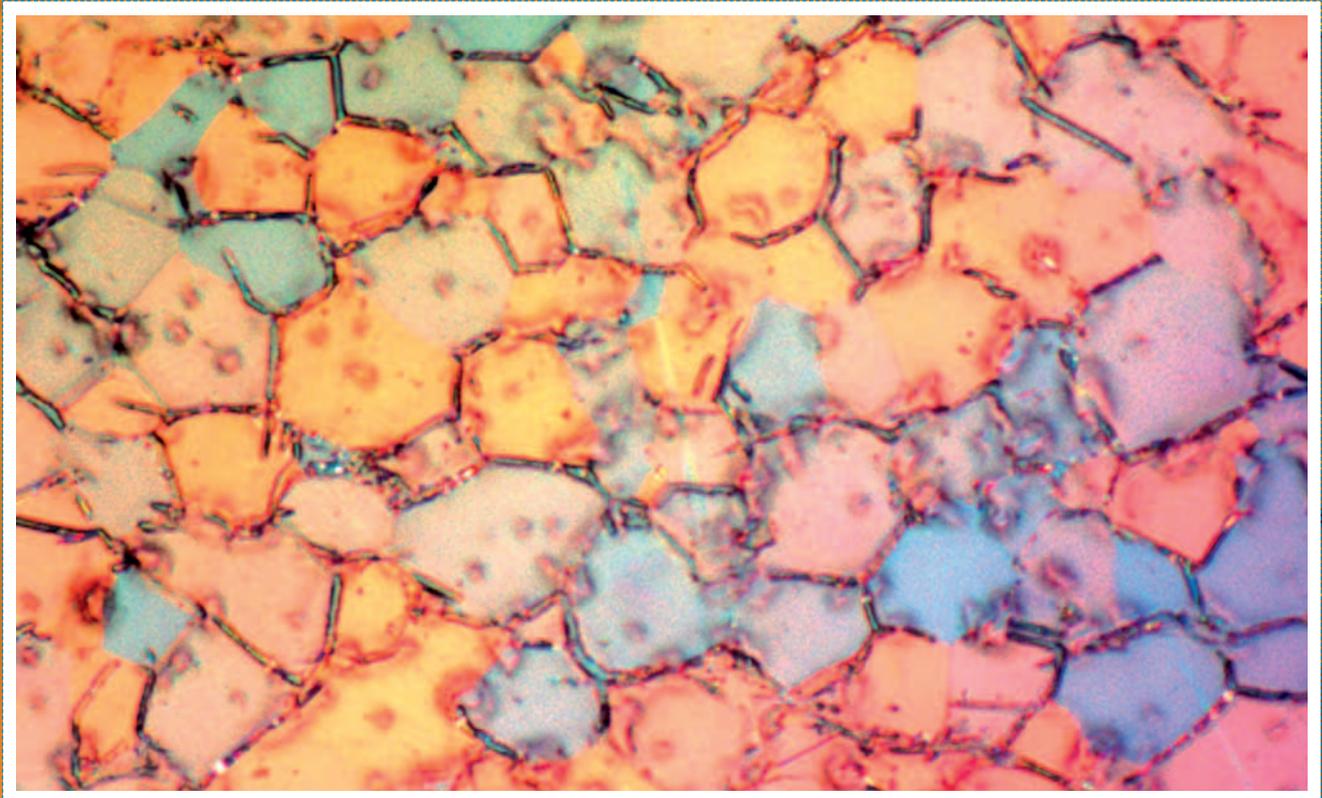
DIRECTION DE
L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

DIRECTION DÉLÉGUÉE
AUX ACTIVITÉS NUCLÉAIRES
DE SACLAY



DIRECTION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

DIRECTION DÉLÉGUÉE AUX ACTIVITÉS NUCLÉAIRES DE SACLAY
DÉPARTEMENT DES MATÉRIAUX POUR LE NUCLÉAIRE



SOMMAIRE

04 ...

LE LECI



38 ...

CARACTÉRISATION
MÉCANIQUE

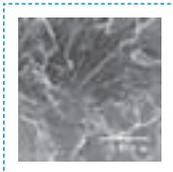


58 ...

COMMENT EFFECTUER DES
EXAMENS SUR MATÉRIAUX
IRRADIÉS AU LECI



CARACTÉRISATION
MICROSTRUCTURALE



CAPACITÉS D'IRRADIATION
AUTOUR DU LECI



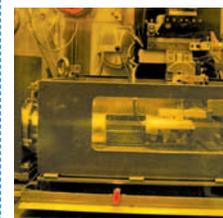
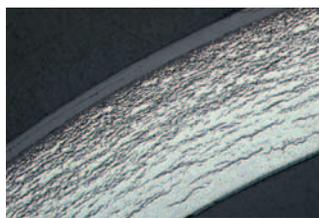
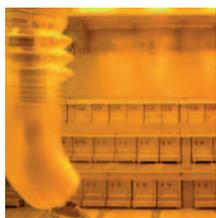
12 ...

54 ...



LE LECI

- 06 ••• Missions du LECI
- 07 ••• Historique
- 07 ••• Stratégie
- 08 ••• Lignes d'enceintes blindées I et K (bâtiment 605)
- 10 ••• Ligne d'enceintes blindées M (bâtiment 625)
- 11 ••• Domaine de fonctionnement



LE LECI

Missions du LECI

Le LECI est un laboratoire "chaud" essentiellement dédié à la caractérisation des matériaux irradiés. Il garde cependant des capacités réduites sur le combustible, en soutien au LECA STAR, à Cadarache. Le LECI se trouve au sein du Service d'Études des Matériaux Irradiés (Département des Matériaux pour le Nucléaire).

Les missions du département sont :

- de contribuer, par des actions de recherches théoriques et expérimentales, au développement des connaissances dans le domaine de la science et du génie des matériaux, afin, en particulier, de développer une science des matériaux permettant de prévoir l'évolution de leurs propriétés en conditions d'usage (irradiation, sollicitations thermomécaniques, couplage avec le milieu...);
- de caractériser les propriétés des matériaux du nucléaire pour déterminer leurs performances, et prévoir leur durée de vie en opération, notamment par modélisation. Ces matériaux peuvent être irradiés ou non, en provenance des programmes de surveillance des installations ou d'irradiations expérimentales ou simulées ;
- d'établir, de faire vivre et d'exploiter les bases de données qui en résultent ;
- de proposer des matériaux nouveaux ou améliorés, permettant de satisfaire aux conditions d'emploi futures et augmenter la durée de vie ou la compétitivité des systèmes correspondants ;
- d'établir les lois et modèles de comportement des matériaux dans les conditions de service, accidentelles et de longue durée, de contribuer à établir les codes de conception correspondants et les dossiers de sûreté utiles aux exploitants et concepteurs ;
- d'effectuer des expertises sur pièces industrielles en retour de service, notamment pour étudier les mécanismes de rupture ou de déformation mis en jeu et pour proposer des solutions d'amélioration.

Le centre CEA de Saclay

Ce centre (certifié ISO 14001) est un des 9 sites de recherche du Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Implanté à quelques kilomètres de Paris, il constitue un centre de recherche et d'innovation de premier plan au niveau européen. Plus de 5 000 personnes y travaillent. Il joue un rôle majeur dans le développement économique régional. Pluridisciplinaire, il exerce ses activités dans des domaines tels que l'énergie nucléaire, les sciences du vivant, les sciences de la matière, le climat et l'environnement, la recherche technologique et l'enseignement.



Le Centre CEA de Saclay est implanté à quelques kilomètres au Sud-ouest de Paris.



Historique de l'installation

Le Laboratoire d'Études des Combustibles Irradiés (LECI), implanté sur le site du centre CEA de Saclay, a été construit et mis en service en novembre 1959. Il a été déclaré le 8 janvier 1968 en tant qu'installation nucléaire de base n°50 (INB n°50).

Le LECI comprend trois lignes d'enceintes blindées :

- ▶ La ligne K a été mise en service en 1959,
- ▶ La ligne I (Isidore) a été mise en service en 1970,
- ▶ La ligne M a été mise en service en octobre 2005.



Le LECI dans les années 60.



Stratégie

Le Laboratoire d'Études des Combustibles Irradiés (LECI) a été retenu, au milieu des années 1990, pour regrouper les moyens de recherche et de développement sur les matériaux irradiés de l'ensemble du CEA, tout en conservant des moyens d'examen de faibles quantités de combustibles irradiés.

Cette décision traduisait une volonté de rationalisation des installations nucléaires du CEA, imposant la fermeture des LHA (Laboratoires de Haute Activité) à Saclay, du LAMA à Grenoble et le regroupement des laboratoires dédiés à une même activité.

Ce choix stratégique est à l'origine du projet PELECI (Projet d'Équipement du Laboratoire d'Études des Combustibles Irradiés) qui comprenait deux volets :

- la rénovation des installations existantes (cellules des lignes K et I) du bâtiment 605, afin de répondre notamment aux exigences formulées lors de l'examen du rapport de sûreté en 1995,

- la construction d'une nouvelle ligne d'enceintes blindées dans une extension du LECI (ligne M). Cette extension étant destinée à recevoir les moyens correspondant aux études réalisées précédemment aux LHA (totalement arrêté depuis fin 2003) ainsi que des équipements nécessaires pour répondre à de nouveaux besoins de recherche au CEA.



Emballage de transport de matières irradiées TN106



Lignes d'enceintes blindées I et K (bâtiment 605)

La ligne I comporte 9 enceintes blindées dont les parois sont constituées de panneaux de plomb coulés dans des caissons d'acier.

Chacune des enceintes blindées (de I1 à I6) dispose de deux télémanipulateurs, d'un hublot et d'une unité de levage. Les cellules I7 à I9 ne possèdent que des télémanipulateurs et un hublot.

La ligne K est constituée des 14 enceintes blindées suivantes :

- 11 enceintes en béton (de K1 à K11),
- 2 enceintes en plomb (K12 et K13),
- 1 enceinte en fonte (K14).

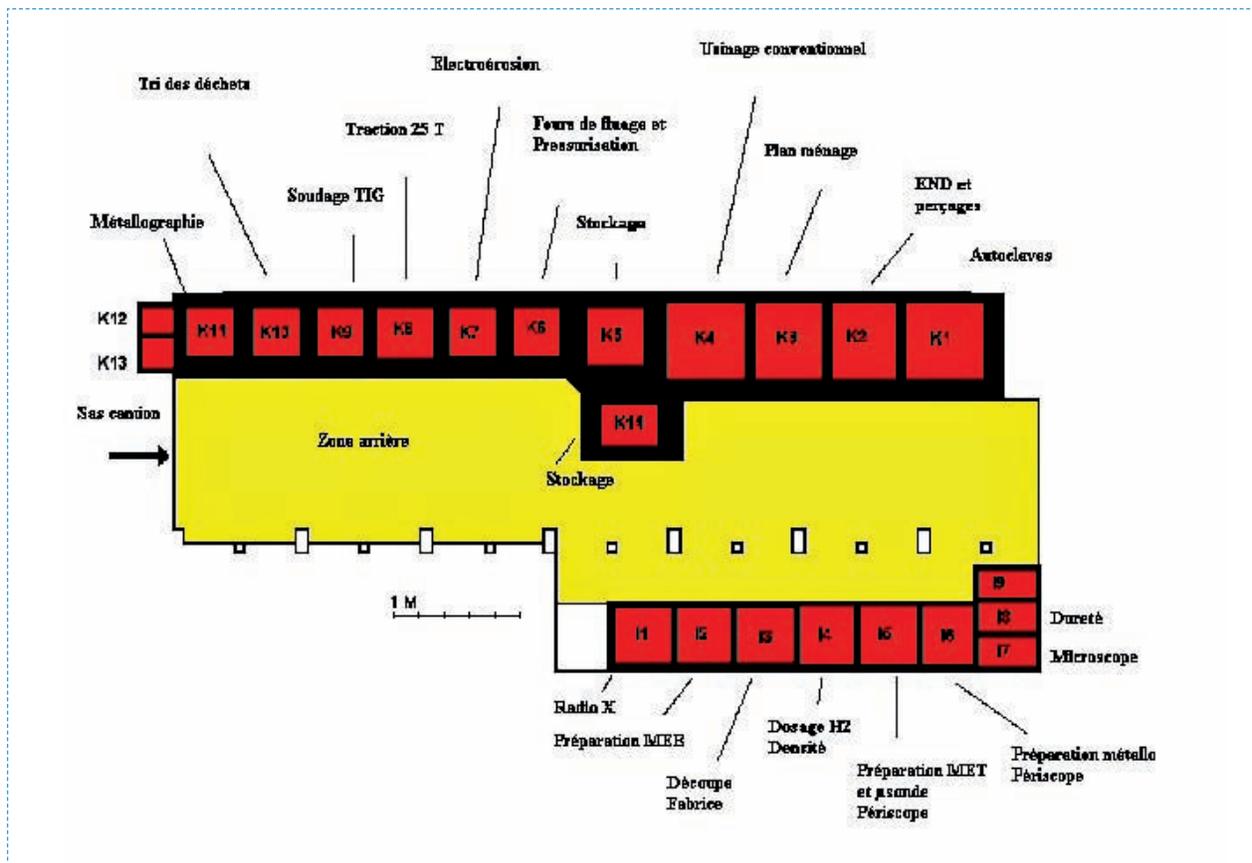
Chacune des enceintes blindées (de K1 à K11) ainsi que la cellule K14 disposent de deux télémanipulateurs, d'un hublot et d'au moins une unité de levage. Les cellules K12 et K13 disposent d'un hublot et de pinces à distance.

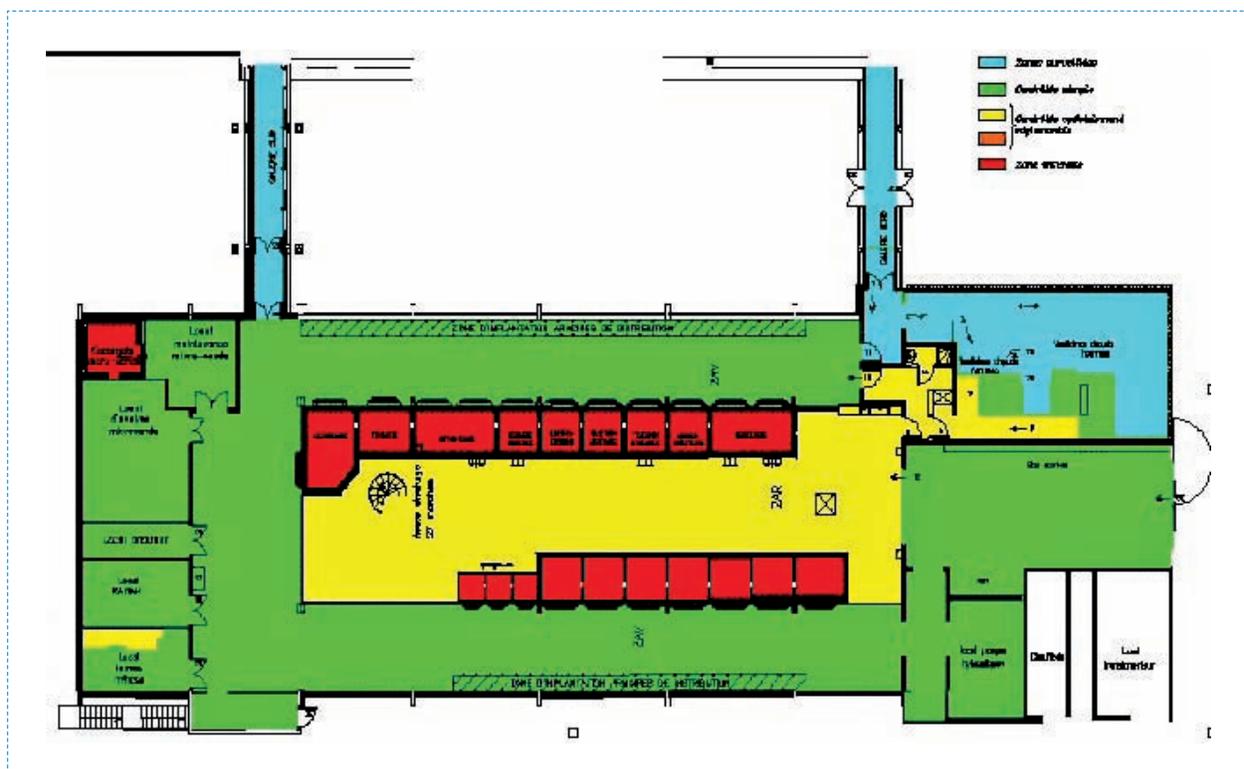
Pour les besoins liés à l'exploitation du LECI, il est à noter que la ligne K comprend :

- deux enceintes blindées dédiées à l'entreposage des combustibles et matériaux irradiés (K5 et K14),
- une enceinte blindée dédiée aux opérations d'évacuation de combustibles sans emploi (K3),
- une enceinte blindée dédiée au tri des déchets radioactifs avant évacuation (K10).



[Plan des lignes I et K.](#)





Plan de la ligne M.

Ligne d'enceintes blindées M (bâtiment 625)

La ligne M comprend 19 enceintes blindées. Chaque enceinte est constituée d'un caisson en acier inoxydable (confinement) sur lequel un assemblage boulonné de panneaux en plomb est réalisé (protection radiologique).

Chacune des enceintes blindées dispose de deux télémanipulateurs, d'un hublot et d'une unité de levage.

Le bâtiment 625 comprend également une zone de caractérisation fine regroupant notamment les locaux suivants :

- Local "lames minces" contenant les boîtes à gants de finition des "lames minces" pour microscopie électronique à transmission,
- Local "Raman" dans lequel est implanté un spectromètre Raman,
- Local "casemate microsonde" dans lequel des microanalyses X par sonde électronique sont réalisées.

Pour les besoins liés à l'exploitation du LECI, il est à noter que la ligne M comprend :

- une enceinte blindée dédiée à l'entreposage des matériaux irradiés (M08),
- une enceinte blindée dédiée à la réception et à la préparation des échantillons en vue des caractérisations de leur surface (M15).

Domaine de fonctionnement

Concernant les matériaux irradiés, le LECI reçoit des échantillons radioactifs de natures chimiques différentes :

- des matériaux de structure métalliques irradiés (acier, alliage Zr, Al...)
- des absorbants de réacteurs expérimentaux et électro-nucléaires (B_4C , HFB_2 ...),
- des verres de retraitement,
- des céramiques et composites,
- des graphites,
- des matériaux polymères.

Concernant les éléments de combustibles irradiés provenant de réacteurs électronucléaires, le domaine de fonctionnement du LECI est le suivant :

- temps de refroidissement d'au moins six mois,
- taux de combustion inférieur à 90 000 MWj/t métal avec un taux d'enrichissement en ^{235}U inférieur ou égal à 4,95 % pour les éléments de combustibles de type UO_2 ,

- taux de combustion inférieur ou égal à 45 000 MWj/t et rapport $Pu/(U+Pu)$ inférieur ou égal à 5% pour les éléments de combustibles de type ($UO_2 - PuO_2$).

Les activités maximales admissibles en équivalent ^{60}Co dans les enceintes blindées du bâtiment 605 du LECI sont les suivantes :

- ▶ $9,1.10^{14}$ Bq pour les enceintes K1 à K5 en béton de la ligne K,
- ▶ $9,1.10^{11}$ Bq pour les enceintes K6 à K11 en béton de la ligne K,
- ▶ $1,2.10^{11}$ Bq pour les enceintes K12 et K13 en plomb de la ligne K,
- ▶ $6,4.10^{13}$ Bq pour l'enceinte K14 en fonte de la ligne K,
- ▶ $1,2.10^{11}$ Bq pour les enceintes I4 à I9 en plomb de la ligne I,
- ▶ $5,3.10^{13}$ Bq pour les enceintes I1 à I3 en plomb de la ligne I.

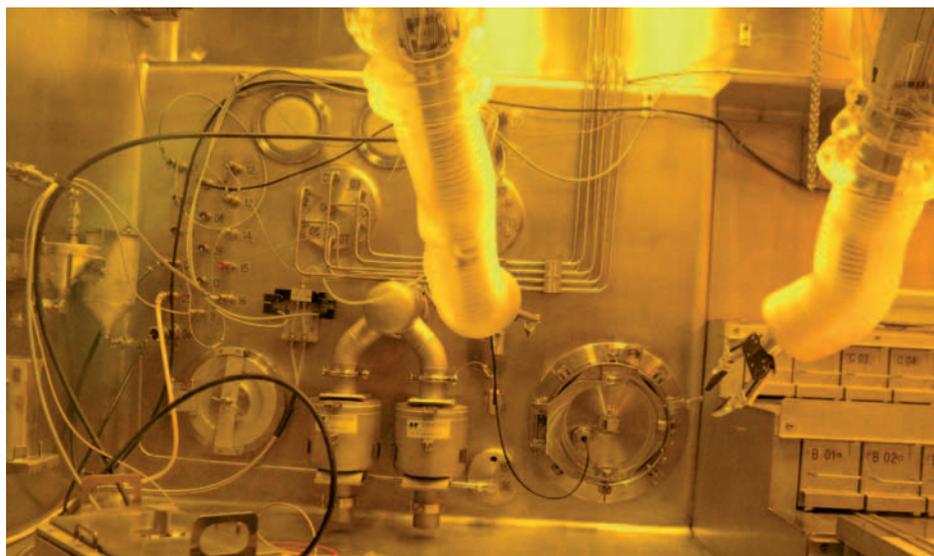
La quantité de matières radioactives présentes dans le



Cellule K10 dédiée au tri et conditionnement des déchets.



Cellule M08 dédiée à la caractérisation et au stockage des échantillons irradiés.



bâtiment 625 du LECI est limitée à :

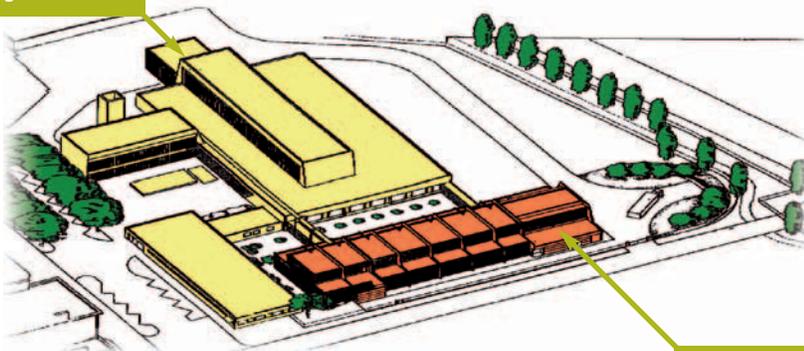
- ▶ Un débit de dose des matériaux irradiés au maximum équivalent à celui généré par 10^{15} Bq de ^{60}Co en cellule M08 et 10^{13} Bq de ^{60}Co dans toutes les autres cellules,
- ▶ 10^{14} Bq en tritium,
- ▶ Une masse totale de 20 g au maximum de combustibles irradiés, sous forme d'échantillons.

Les caractéristiques et dimensions de ces matériaux sont limitées par les spécificités des conteneurs et des enceintes blindées dans lesquelles les équipements scientifiques sont implantés.

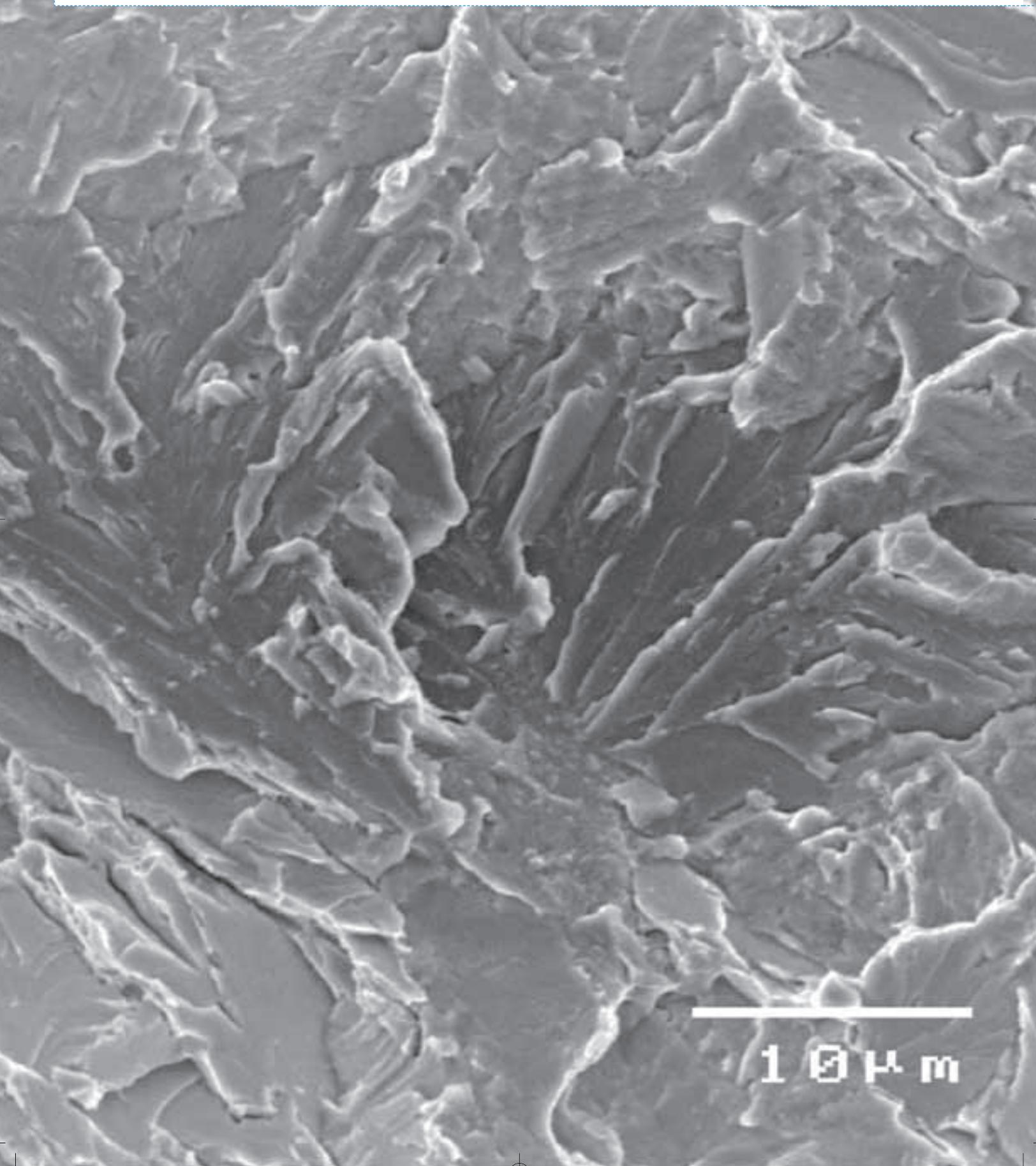
Vue schématique
du LECI.



Bâtiment 605
Lignes I et K



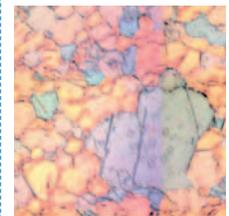
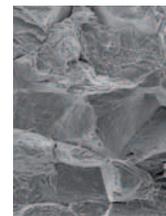
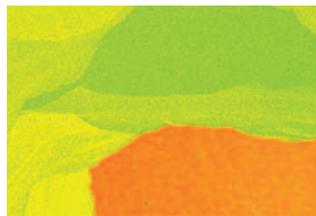
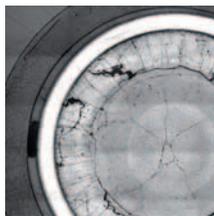
Bâtiment 625
Ligne M



CARACTÉRISATION MICROSTRUCTURALE

Laboratoire de Microscopie et d'Études
de l'Endommagement

- 14... Missions du Laboratoire
- 15... Liste des équipements
- 17... Boucle de corrosion
- 18... Examens non destructifs
- 20... Analyse des gaz
- 21... Refabrication de crayons courts combustible
- 22... Fours de fluage
- 23... Usinage conventionnel
- 24... Soudage
- 25... Usinage par électroérosion
- 26... Microscopie optique
- 27... Dureté, microdureté instrumentée
- 28... Densité
- 29... Microscopie électronique à balayage
- 30... Préparation des échantillons pour microsonde et MET
- 31... Microscopie électronique en transmission
- 32... Métallographie et préparation lames minces en zone froide
- 33... Electrochimie
- 34... Thermobalance et autoclaves
- 35... Diffractométrie X
- 36... Microscopie Raman
- 37... Microsonde électronique
- 37... Microsonde nucléaire



LABORATOIRE DE MICROSCOPIE ET D'ÉTUDES DE L'ENDOMMAGEMENT

Ce laboratoire fait partie du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) en France.

Il est situé à environ 20 km au Sud-ouest de Paris sur le centre de Saclay, principalement dans le bâtiment 605. Dans l'organisation du CEA, il est rattaché à la Direction de l'énergie nucléaire (DEN), au Département des matériaux pour le nucléaire (DMN) et au Service d'études des matériaux irradiés (SEMI).

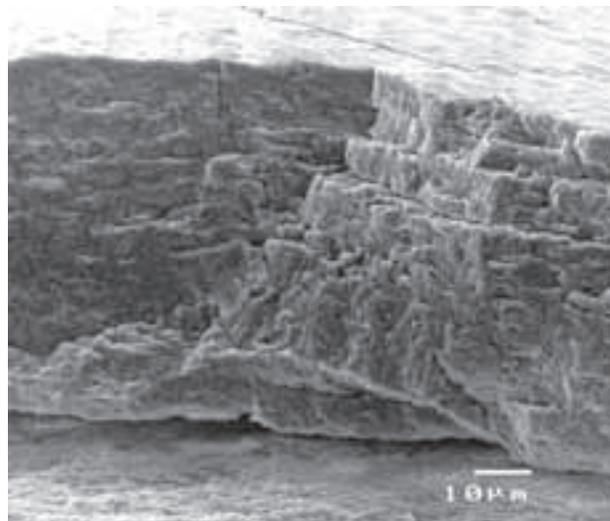
L'équipe est composée de 35 personnes : ingénieurs, techniciens, secrétaire, apprentis ingénieurs, DRT, post-doctorant, thésards.

Les principales missions du laboratoire sont :

- D'assurer la caractérisation métallurgique et physique des matériaux irradiés en provenance des centrales REP ou d'irradiations expérimentales, en vue de déterminer l'évolution de leur comportement sous irradiation en liaison avec les autres unités de la DEN.
- D'étudier le comportement en corrosion généralisée des matériaux de gainage irradiés.
- De réaliser les usinages, mises en forme d'éprouvettes ou échantillons irradiés.
- De fabriquer des crayons courts expérimentaux de combustible pour les programmes de R&D.
- De contribuer à l'étude de nouveaux moyens d'essais en général (fours de fluage, soudage laser, banc END, MET...) et leur mise en œuvre en cellule blindée.
- De suivre la conception, réalisation et interprétation des programmes de R&D mettant en œuvre dans la plupart des cas des irradiations expérimentales.
- De maintenir la veille technologique sur les études concernant le comportement des matériaux graphite sous irradiation permettant notamment un soutien lors des choix réalisés pour les systèmes du futur.



Faciès de rupture d'un oxyde de zirconium desquamé.

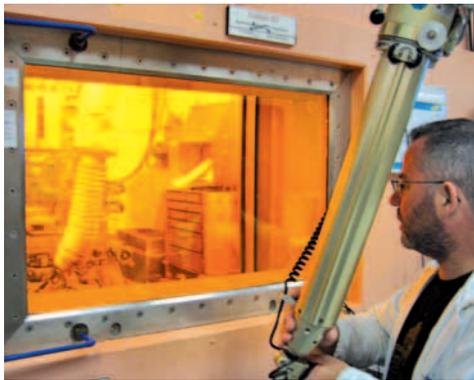


Nous travaillons principalement sur des matériaux métalliques tels que les aciers, alliages de zirconium, d'aluminium et nickel et réalisons également quelques fabrications ou examens sur crayons combustibles, sur céramiques, graphite ou matériaux composites.

Le laboratoire a maintenant plus de 30 années d'expérience.

Liste des équipements et localisation (1/2)

Les équipements du Laboratoire sont répartis dans les trois lignes de cellules du LECI, ligne K, ligne I et ligne M, dans la zone nord du LECI. Certains équipements sont basés dans d'autres bâtiments sur le centre de Saclay.



Ligne K.

La ligne K comprend 14 cellules blindées. Les murs sont en béton baryté d'un mètre d'épaisseur. Les cellules ont une taille importante ($3 \times 3 \times 4 \text{ m}^3$). Cette ligne a été rénovée entre 1996 et 2006. Chacune des cellules a été assainie et équipée de nouveaux moyens d'essais.



Ligne I.

La ligne I comprend 9 cellules blindées. Les cellules sont de taille plus petite qu'en ligne K ($2 \times 2 \times 3 \text{ m}^3$). Les cellules sont constituées de murs en plomb (25 cm d'épaisseur), de hublots et de bras télémanipulateurs. La ligne a été en partie rénovée en 1997-1998.

Ligne M.



La ligne M comprend 19 cellules mises en actif en 2005, ainsi qu'une zone destinée aux analyses de surface.



Le Laboratoire comprend une zone équipée de boîtes à gants destinées à recevoir des pièces de faible ou moyenne activité.

Zone MA.



Liste des équipements et localisation (2/2)

<p>Ligne I/Leci. </p>	<p>Cellule I1 > Banc de radiographie. > Soudage laser. > Banc d'examens non destructifs sur crayons courts.</p> <p>Cellule I2 > Préparation échantillons pour le MEB.</p> <p>Cellule I3 > Refabrication de crayons courts combustible/usinage.</p> <p>Cellule I4 > Dosage hydrogène et mesure de densité.</p> <p>Cellule I5 > Périscope, préparation échantillons microsonde et lames minces.</p> <p>Cellule I6, I7, I8 > Microscopie optique, microdureté et dureté.</p>	
<p>Ligne K/Leci. </p>	<p>Cellule K1 > Boucle de corrosion conditions réacteurs à eau légère (REL), 3 autoclaves.</p> <p>Cellule K2 > Banc d'examens non destructifs sur crayons (métrologie diamétrale, zircone, Courants de Foucault). > Spectrométrie gamma et perçage crayon (analyse des gaz de fission).</p> <p>Cellule K4 > Préparation d'éprouvettes, usinage.</p> <p>Cellule K6 > Pressurisation d'éprouvettes, essais de fluage.</p> <p>Cellule K7 > Electro-érosion par enfonçage, usinage.</p> <p>Cellule K9 > Refabrication de crayons courts combustible, soudage TIG.</p>	
<p>Laboratoire Moyenne Activité/Leci. </p>	<p>Ligne M/Leci. </p>	<p>Zone froide et faible activité/Leci. </p>
<p>> MEB. > Diffractométrie X. > Quantification de l'hélium et du tritium dans le carbure de bore irradié (EXAG).</p>	<p>> Microsonde électronique, Microscopie Raman, lignes BAG pour la préparation de lames minces. > Cellule M06 : Electro-érosion à fil, usinage.</p>	<p>> Electrochimie. > Autoclave 9 l haute pression, haute température. > MEB et Microscope optique. > MET. > Labo métallo et préparation lames minces.</p>
<p>Bâtiment 453. </p>	<p>Bâtiment 455. </p>	
<p>> MET sur échantillons irradiés.</p>	<p>> Labo corrosion froid (thermobalance, autoclaves).</p>	

Boucle de corrosion, conditions REL

■ Réalisation d'essais de corrosion en autoclaves à recirculation

■ Autoclaves

- ▶ 3 autoclaves de 3 litres.
- ▶ 6 couvercles d'autoclaves :
 - 3 couvercles "standard" permettant la mesure de pression (bar), température (°C), et pression partielle (H_2),
 - 1 couvercle "électrochimie" : idem couvercle standard avec 2 piquages mesures électrochimiques (4 électrodes chacun),
 - 1 couvercle traction lente / fluage / charge constante : idem couvercle standard avec 1 axe de traction + 1 piquage mesure électrochimique,
 - 1 couvercle "mesure de la vitesse de propagation des fissures d'IASCC*" : idem couvercle standard avec 1 piquage mesures électrochimiques (4 électrodes chacun), 1 axe de traction + 1 passage d'amenée de courant (2 fils).

* Corrosion sous contrainte assistée par l'irradiation

■ Conditions de fonctionnement en boucle

- ▶ PWR : 360°C, 200 bars, Li, B, H_2 .
- ▶ BWR : 360°C, 200 bars, O_2 (200 ppb max).
- ▶ Débit : 40 litres/heure max (10 litres/heure dans chaque autoclave).
- ▶ Mesures chimiques en ligne : H_2 , O_2 , conductivité.

■ Machine de traction : traction lente / fluage / charge constante

- ▶ Charge maximale : 50 kN.
- ▶ Vitesse de traction lente : $2,7 \cdot 10^{-10}$ m.s⁻¹.

■ Conditions de fonctionnement en autoclaves statiques :

- ▶ En eau/vapeur : 360°C, 187 bars.
- ▶ En vapeur : 415°C, 100 bars.

■ Équipements annexes :

Centrale de gaz (située en dehors du bâtiment) : N_2 , Ar/He, O_2 , H_2 . Cuves de préparation (x2), de mélange, et d'effluents. Pompes. Réchauffeur/Refroidisseur de l'eau de la boucle. Système de refroidissement des piquages des autoclaves. Lignes de résines et de filtres.

■ Contrôle/Commande et Sûreté

L'ensemble de l'installation est géré par un automate piloté depuis un PC de commande situé en zone avant. Tous les éléments (positions de vannes, mesures), sont reportés sur ce contrôle/commande qui gère également la sûreté de l'installation.



Boucle de corrosion, autoclaves en cellule K1.



Examens non destructifs

Bancs END

■ Crayons combustibles courts (2004)

- ▶ Crayons longueur < 800 mm, \varnothing max. 9,5 mm adaptable.
- ▶ Métrologie, épaisseur de zircone (pas de 0,8 mm, 8 génératrices).
- ▶ Courants de Foucault (sondes encerclante/ponctuelle fréquence 100 kHz à 400 kHz).

■ Crayons combustibles longs

- ▶ Banc vertical pour crayons 4 m : Renault Automation reconditionné en 1995 pour passage de crayons courts < 700 mm, \varnothing Max. 9,5 mm (adaptable).
- ▶ 3 têtes de mesure interchangeables.
- ▶ Mouvement vertical du crayon.
- ▶ Banc permettant des mesures tous les 22°5 (soit 8 diamètres).
- ▶ Métrologie
 - Capteur inductif différentiel LVDT.
 - Tête de mesure de 2x2 capteurs disposés à 90°.
 - Mesures statiques tous les 0,8 mm.



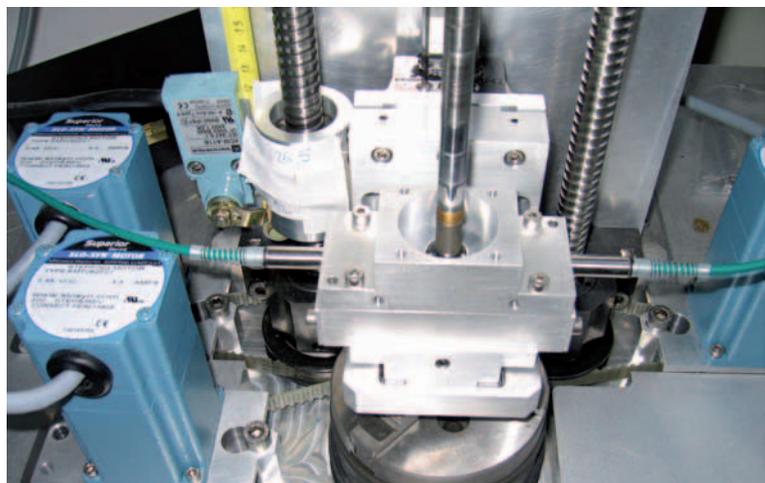
Cellule K2 : aperçu du banc de métrologie diamétrale sur la droite ; banc de perçage de crayons combustibles à gauche.



- ▶ Épaisseur de zircone
 - Capteur ponctuel de Courants de Foucault : FISCHER.
 - Mesures statiques tous les 0,8 mm.
- ▶ Contrôle de santé de la gaine du crayon
 - Sonde encerclante de Courants de Foucault (250 Hz).
 - Vitesse de défilement 700 mm/mn.
 - Localisation et caractérisation de défauts internes, externes ou traversants.



Banc d'examen non destructifs pour crayons combustibles courts refabriqués. Ce banc permet de réaliser les métrologies diamétrales le long de plusieurs génératrices, la mesure de l'épaisseur d'oxyde ainsi que le contrôle de santé de la gaine des crayons.



Banc de spectrométrie gamma

- Limite de volume : \varnothing 25 mm x h 65 mm.
- Capteur germanium et chaîne de mesure CANBERRA.
- Limité aux faibles activités (1.10^7 Bq/g) par saturation de la diode.

Banc de radiographie

- Générateur de rayonnement X, 420 kVolts (MULLER MG 420S).
- Radiographie pièces métalliques (toutes pièces style crayon Fabrice) pour vérification soudure, assemblage, défaut santé matière et/ou vérification de forage sur crayon combustible.



Plate-forme du banc de radiographie X en cellule 11.

Radiographies de crayons combustibles (soudures bouchons ou colonne fissile), de soudures TIG ou laser pour contrôle de l'absence de défauts (retassures, soufflures...).

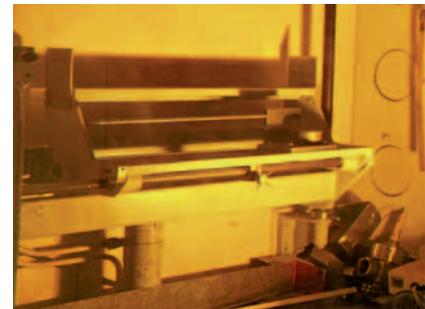


Plate forme du banc de radiographie X en cellule 11.

Ci-contre une radiographie de conteneur destiné à une irradiation dans le réacteur OSIRIS. Le Laboratoire a usiné différents échantillons prélevés dans des matériaux irradiés, et les a reconditionnés. Le conteneur a été fermé par soudage laser après pressurisation à 1 bar He. Les échantillons doivent être réirradiés dans le réacteur OSIRIS.



Périscope OPTIQUE PETER

- 2 grossissements : x2 et x9.
- 1 tête binoculaire équipée d'une sortie photo polaroid 4"x 5" et d'une sortie vidéo avec caméra couleur tri-CCD.
- Rotation du bras vertical de $\pm 45^\circ$.
- Platine XYZ :
 - ▶ 100 x 100 x 100 mm motorisée.
 - ▶ Pilotage et système d'acquisition SIS.



Périscope de la cellule 15.



Analyse des gaz

Dosage Hydrogène

Installation permettant l'extraction des gaz et leur récupération. La mesure de la teneur H_2 s'effectue par spectrométrie de masse dans un autre laboratoire.

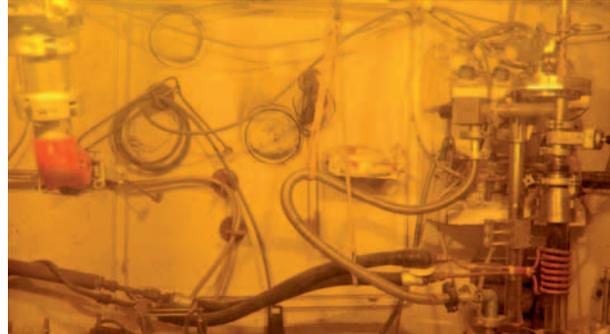
- Four hautes fréquences : CELES 50 KW
 - ▶ Commande du four par potentiomètre, contrôlée par thermocouple de type Cr-Al pour une température < 1000°C et par un thermocouple de type W-Re doublé d'un pyromètre optique pour une température > 1000°C.
 - ▶ Creuset tungstène pouvant contenir des pièces de taille max. \varnothing 10 mm x h 15 mm.
 - ▶ Mini 500°C Max 2 500°C.
- Pompe turbo : ALCATEL.
- Pyromètre optique : IRCON.
- Pompe de transfert à mercure : TOEPLER.



Boîte à gants (BAG) de prélèvement des gaz de fission pour analyse au spectromètre de masse.



Four HF pour dosages H_2 ou He en cellule I4.



BAG dosage hydrogène



Le gaz prélevé par chauffage haute fréquence est récupéré par pompage Toeppler dans une ampoule de verre, placée en boîte à gants. Cette ampoule est ensuite analysée par spectromètre de masse ou chromatographie en phase gazeuse.

Analyse des gaz de fissions

Installation permettant l'extraction des gaz et leur récupération. La mesure de la teneur en xénon et en krypton s'effectue par spectrométrie de masse dans un autre laboratoire.

- Banc de perçage
 - ▶ Equipement à chargement vertical pour crayon.
 - ▶ Combustible \varnothing 9,5 mm h. 4000 mm (max.).
 - ▶ Perçage de la gaine par poinçon.
 - ▶ Mesure du volume libre (volume de référence 300 cm³).
 - ▶ Prélèvement des gaz de fission (en ZAV).
 - ▶ Mesure de la pression interne de crayon.

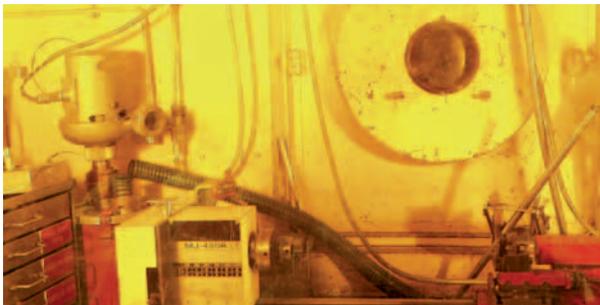
Refabrication crayons courts combustible Pressurisation éprouvettes et fours de fluage

Refabrication crayons courts

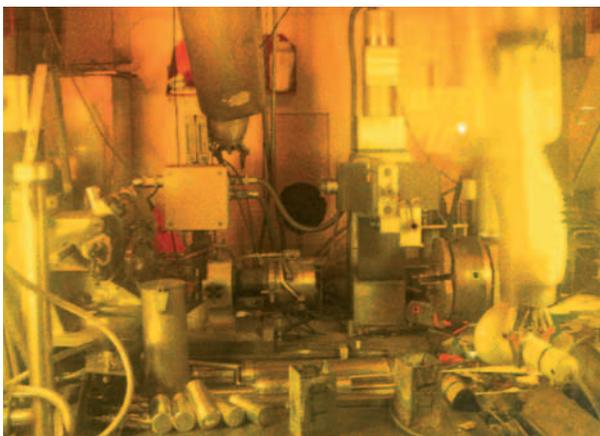
- Découpes Forage
 - ▶ Tour horizontal : MJ480A.
 - ▶ Usinage pièces max. 250 mm \varnothing 10 mm (diamètre Fabrice, sinon changement de pince \varnothing mini 4 mm à 14 mm).
 - ▶ Forage et coupe pièces petit diamètre, foret diamanté.
 - ▶ Tronçonneuse.
 - ▶ Tronçonnage : \varnothing mini 4 mm à 60 mm.



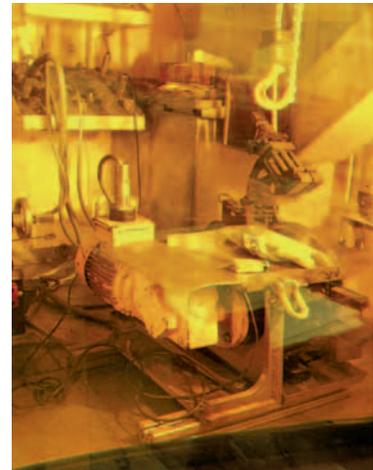
Tour de forage en cellule I3 pour crayons combustibles lors des refabrications "FABRICE".



Soudeuse et queusoteuse en cellule K9.



Tronçonneuse diamantée en cellule I3 pour découpe de crayons combustibles.



- Soudage bouchons
 - ▶ Soudeuse TIG : Centaur III 150P Tw1.
 - ▶ Soudage en rotation \varnothing max. 15 mm (type Fabrice).
 - ▶ Pointage.
- Queusotage sous vide : MORANE
 - ▶ Queusotage < 40 bars, Argon, Hélium.
 - ▶ Pression contrôlée par manomètre électronique.

Équipements du LECl

le LECl possède tous les équipements nécessaires pour refabriquer des crayons courts "FABRICE" : découpe, forage, radiographie X, soudage TIG et laser, pressurisation, gravage, test d'étanchéité He, caractérisations métrologie diamétrale, épaisseur d'oxyde, contrôle de santé de la gaine. Ces crayons refabriqués sont destinés aux rampes de puissance en réacteur expérimental.

Contrôle d'étanchéité

Test d'étanchéité : ALCATEL ASM100 TURBO CL (détection hélium).

Fours de fluage

Bancs de pressurisation de gaines

- Queusotage jusqu'à 200 bars : argon, hélium.
- \varnothing 15 mm max. Longueur 800 mm max.
- Avec banc froid pour paramétrer.
- Capteurs pression KELLER.

Métrieologie des gaines par banc laser

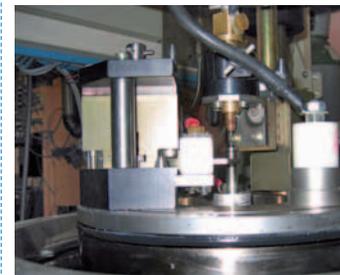
- Utilisation d'un banc LASERMIKE en cellule I1.



Banc de pressurisation froid, identique au banc implanté en cellule.



Cloche de pressurisation 200 bars en cellule K6.

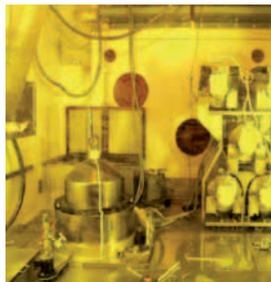


L'éprouvette cylindrique est placée sous la torche TIG. Le bouchon de l'éprouvette à pressuriser est muni d'un queusot de diamètre 0,7 mm.



Cellule K6

La cellule K6 comporte un banc de pressurisation (200 bars) ainsi que 5 fours de fluage ; ces fours de fluage sont utilisés pour les études d'entreposage longue durée des éléments combustibles. Après dépastillage, des tronçons de gaines combustibles sont munis de bouchons soudés et pressurisés puis introduits dans les fours de fluage. La déformation de ces gaines est déterminée régulièrement par mesure laser.



Fours de fluage

- 5 fours température < 550°C.
 - ▶ Sous vide primaire, balayage argon possible.
- 6 zones de contrôle par four.
- 3 thermocouples type K "doigt de gant".

Usinage conventionnel

Usinage par commande numérique d'échantillons et d'éprouvettes sur matériaux irradiés

- Fraiseuse : EMCO PC mill 50
 - ▶ Course 200 x 200 x 125 mm.
 - ▶ Consommables : graisse, huile, argon, fraises tous modèles, pinces, porte-fraises.
 - ▶ Contrôle des pièces par μ mètre MITUTOYO, pied à coulisse digital + mécanique et laser.
 - ▶ Étalonnage à chaque nouvelle pièce par Palmer (BIG DAISHOWA Point master).
 - ▶ Pilotage par logiciel EMCO.
- Tour : EMCO
 - ▶ Course 170 x 60 mm.
 - ▶ \varnothing 20 mm max. dans la broche.
 - ▶ Consommables : graisse, huile, argon, outils.
 - ▶ Contrôle des pièces par μ mètre MITUTOYO, pied à coulisse digital + mécanique et laser.
 - ▶ Pilotage par logiciel EMCO.

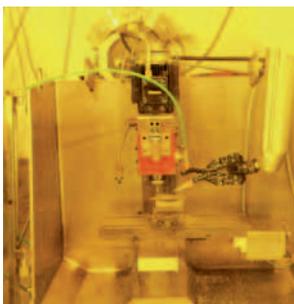


Tour K4.

Implantation d'un tour à commande numérique nucléarisé en cellule K4. Tous les équipements sont adaptés au travail par télémanipulation ; plastiques, éléments optiques, cartes électroniques ne résistent pas au rayonnement gamma.



Implantation d'une fraiseuse à commande numérique nucléarisée en cellule K4.



Éprouvettes réalisées au Laboratoire en cellule blindée.



- Graveuse : MECAGRAV.
- Tronçonneuse
 - ▶ Tronçonneuse à disque diamanté.
- Scie KASTO
 - ▶ Coupe des pièces max. 150 mm x 150 mm.
- Examens visuels par caméra couleur EXAVISION.
- Métrologie (laser).

Soudage-découpe

- Soudeuse TIG : Centaur III 150P Tw1.
 - ▶ Soudage en rotation \varnothing max. 15 mm (type Fabrice).
 - ▶ Pointage.

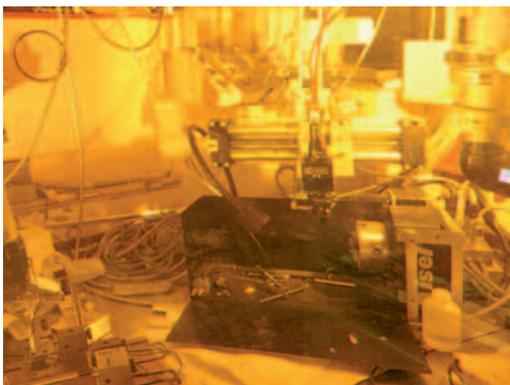
Éprouvettes
soudées TIG et
laser



Éprouvette en place dans son mandrin
avant soudage laser au plan focal



Platine de soudage laser en cellule I1



Soudeuse TIG en cellule K9.



■ Soudeuse laser

- ▶ Source Laser Nd-YAG 400 W avec commande informatisée.
 - ▶ Groupe froid en circuit fermé.
 - ▶ Platine de soudage avec mandrin en rotation froide.
 - ▶ Platine de soudage avec mandrin en rotation chaude (2004).
 - ▶ 2 fibres optiques.
- Applications
- ▶ Soudage de bouchons sur gaines : Zy, inconel, Acier...
 - ▶ Découpe, perçage possible.

Une fibre optique permet de relier le laser à la platine de soudage implantée en cellule. La platine de soudage située hors cellule permet de paramétrer le laser avant soudage sur matériaux irradiés.

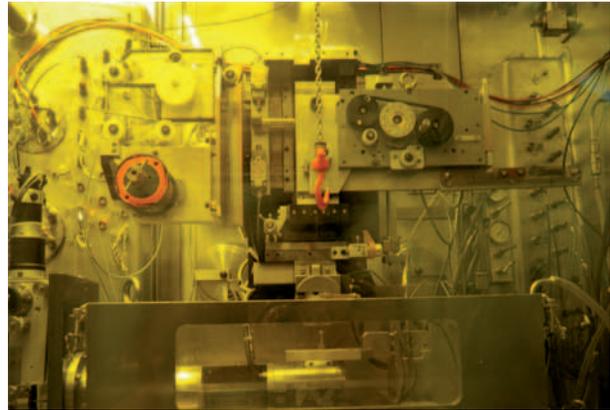


Le LASER pulsé YAG 400W, son groupe puissance, le groupe refroidissement ainsi qu'une platine de soudage froide sont situés à environ 50 m de la cellule blindée I1.

Usinage par Électro-érosion

Réalisation d'éprouvettes pour essais mécaniques
par électro-érosion par enfonçage

- Baie électro-érosion
 - ▶ Usinage électro-érosion par enfonçage sous eau désionisée.
- Centrale de production d'eau désionisée : MILIPORE
- Machine électro-érosion
 - ▶ Pièces taille max. 100 mm (L) x 180 mm (l) x 25 mm (h).
 - ▶ Tous types métaux (Zy, acier, inconel, AG3Net...).
 - ▶ Décapage des pièces oxydées par lime diamantée.
 - ▶ Nature des électrodes : sparkal, cuivre...



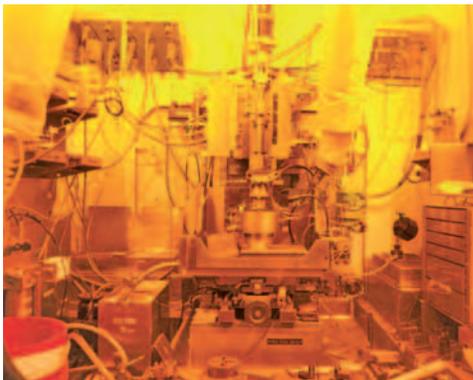
Machine d'usinage par électroérosion à fil.

Réalisation d'éprouvettes pour essais mécaniques
par électro-érosion à fil

- ▶ Pièces taille max. : 150 mm³.
- ▶ Tous types métaux (Zy, acier, inconel, AG3Net...).
- ▶ Diélectrique eau désionisée.
- ▶ Fil laiton/zinc.
- ▶ Programmation et pilotage par commande numérique.

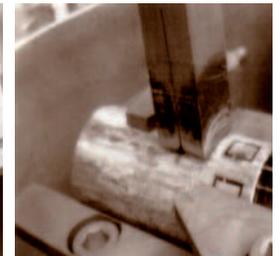


Machine d'usinage par électro-érosion par enfonçage.



Usinage par électro-érosion par enfonçage d'échantillons destinés à des mesures de densité.

Les deux machines d'usinage par électro-érosion ont été développées au Laboratoire. Elles fonctionnent toutes deux sous diélectrique eau désionisée. Ce type d'usinage n'induit pas de contraintes mécaniques.



Microscopie optique

Moyens de préparation

- Polisseuses
 - ▶ 2 polisseuses \varnothing 250 mm pouvant recevoir des échantillons \varnothing 100 mm max.
- Tronçonneuse lente : BUEHLER
 - ▶ Echantillon \varnothing max. 20 mm.
 - ▶ Vitesse réglable, coupe sous eau.
- Vibro-polisseuse : BUEHLER
 - ▶ Permet le polissage d'échantillons \varnothing max. 150 mm.
 - ▶ Amplitude réglable.
- Cloche d'enrobage sous vide
 - ▶ Enrobage araldite d'échantillons \varnothing 100 mm max.

Microscopie optique

- Microscope optique : OPTIQUE PETER (sur base Olympus)
 - ▶ Grossissements : 12,5 – 50 – 100 – 200 – 500- 1000.
 - ▶ Fond clair, fond noir, polarisation, contraste interférentiel.
 - ▶ Microdureté Vickers et Knoop (de 0,4 à 400 g).
 - ▶ Platine XY : 100 mm x 200 mm.
 - ▶ Diamètre échantillons jusqu'à 100 mm.
 - ▶ Capture & analyse d'images SIS.



Microscope optique et cellule de préparation.



Microscopie optique en froid

- REICHERT-JUNG MEF3
 - ▶ Observation métallographique.
 - ▶ Grossissement 1000 max. avec caméra (x1,2) permettant de faire des photos numériques (imprimante SONY).
 - ▶ 5 objectifs : 5, 10, 20, 50, 100.
- OLYMPUS PM10 AD
 - ▶ Grossissement 1000 max.
 - ▶ 5 objectifs : 5, 10, 20, 50, 100.
- Binoculaire : Olympus SZX12
 - ▶ Grossissement 90 max. (zoom de 0,7 à 9 x).



Matériels de préparation en zone froide.

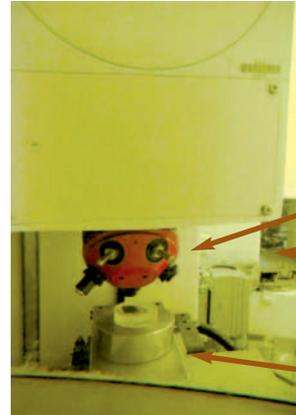
Dureté

Machine de dureté

- Machine de dureté : EMCO TEST
 - ▶ Dureté Vickers + Brinell + Rockwell (de 29,4 à 981 N).
 - ▶ Mesure par analyse d'image.
 - ▶ Platine XY : 50 mm x 100 mm.



Machine de dureté en cellule 18.



Tourelle motorisée

Transfert I6/I8

Platine motorisée XY

Machine de microdureté instrumentée

- Microdureté instrumentée ISO 14577
 - ▶ Mesure en continu, pendant un essai de dureté, de la force appliquée et de la profondeur de pénétration de l'indenteur.
 - ▶ Résultats : module d'Young, dureté, travail plastique et élastique, fluage de dureté, relaxation de dureté, résistance à la rupture.
 - ▶ Indentations : Vickers, Rockwell, Knoop, Cube Corner.
- Microrayure instrumentée ISO 1073-3
 - ▶ Mesure en continu de la force de frottement et de l'émission acoustique pendant la rayure. Obtention des charges critiques sur couches minces.

Spécifications techniques

- | | | |
|------------------------------------|---|---------------------------------|
| • Gamme de charge | > | 0.03 – 30 N |
| • Résolution de la charge | > | 0.3 mN |
| • Profondeur maximum | > | 200 µm |
| • Résolution de la profondeur | > | 0.3 µm |
| • Déplacements motorisés | > | XYZ, ı(Z) : 120 x 45 x 30, 360° |
| • Agrandissement microscopie vidéo | > | 200x, 800x, 2000x, 4000x |
| • Module de chauffage | > | -20°C à 450°C |
| • Vitesse de scratch | > | 0.4 à 600 mm/mn |



Machine de microdureté instrumentée en cellule 19.



Densité

Densité par immersion (bromobenzène)

et/ou double pesée

- Balance : METTLER AE 163
 - ▶ Masse max. : 1000 g.
 - ▶ Appareil d'imprégnation.
 - ▶ Tout type d'échantillons d'un poids maximum de 180 g.
 - ▶ Taille max. échantillon 5 cm x 5 cm x 3 cm (Ø x h x l) (échantillons non poudreux).



Détermination de la densité en cellule I4 ;
balance avec report de mesure externe.



pycnomètre hélium 1 cm³.

Densité par pycnométrie hélium

- ACCUPYC 1330 1CC Glove Box
 - ▶ Balayage gazeux ou sous vide.
 - ▶ Analyse automatique 99 mesures.
 - ▶ Pression de mesure réglable.
 - ▶ Toute nature d'échantillon (solide, pulvérulent, liquide, pâteux).
 - ▶ Volume échantillon : 0,1 à 0,9 ml.
 - ▶ Reproductibilité > 0,03% du volume échantillon.

Microscopie Électronique à Balayage

Préparation des échantillons

- Tronçonneuse de précision : BUEHLER
 - ▶ Echantillon \varnothing max. 20 mm.
 - ▶ Vitesse réglable, coupe sous eau.
- Métalliseur Au-Pd et Carbone
 - ▶ POLARON CA508.
 - ▶ BIO-RAD SC500.

Microscopes Électroniques à Balayage

- MEB froid : JEOL JSM 5400
 - ▶ Analyse EDX (LINK pentafet) logiciel eXL.
 - ▶ 1 détecteur d'électrons rétrodiffusés.
 - ▶ Déplacement (X; Y; Z; Tilt; Rotation).
- MEB nucléarisé : JEOL JSM-5400
 - ▶ Déplacement (X; Y; Z; Tilt; Rotation) par banc de contrôle MICRO/CONTROLE.
 - ▶ Diamètre des échantillons \varnothing 50 mm max.
 - ▶ 2 détecteurs d'électrons rétrodiffusés : Détecteur ROBINSON, détecteur classique à diode (JEOL).
 - ▶ Acquisition d'images numériques.
 - ▶ Logiciel SEMAFORE (JEOL).
 - ▶ Analyseur WDS (spectromètre).
 - ▶ MIKROSS avec logiciel d'acquisition PEAK.



Vue générale du MEB implanté en cellule blindée.



Colonne du MEB implanté en cellule ; le MEB est équipé d'un spectromètre WDS.



MEB situé en zone "froide" permettant de réaliser des analyses sur matériaux non irradiés.



Préparation des échantillons pour microsonde et MET

Microsonde électronique

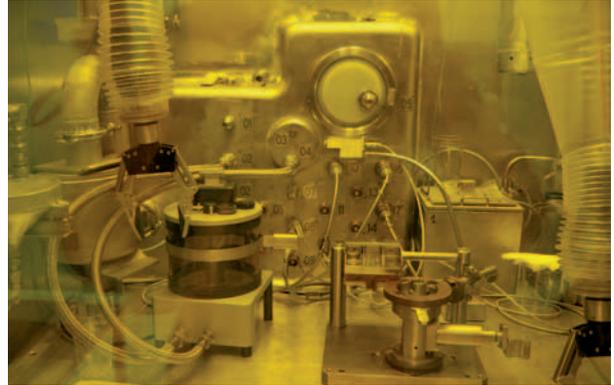
- Polisseuses
 - ▶ 2 polisseuses \varnothing 160 mm pouvant recevoir des échantillons \varnothing max. 50 mm.
 - ▶ Vitesse réglable.
- Tronçonneuse lente : BUEHLER
 - ▶ Echantillon \varnothing max. 20 mm.
 - ▶ Vitesse réglable.
- Four d'imprégnation métallique (Sn-Bi)
 - ▶ Enrobage échantillons max. \varnothing 20 x h 9 mm.
 - ▶ Chaque échantillon est enrobé dans un moule.



Boîte à gants de préparation des lames minces destinées aux observations par microscopie électronique à transmission.



Préparation des échantillons destinés aux expertises microsonde en cellule M14.



Lames minces

Lames transverses

- Dimpler
 - ▶ Abrasion mécanique concave avant amincissement ionique ou électrolytique des lames minces.
 - ▶ Echantillons \varnothing 3 mm, épaisseur environ 100 μ m.
- Plaque chauffante
 - ▶ Collage des échantillons à la cire sur les supports "Dimpler" ou pour découpe de tronçonnage.
- Abrasion ionique des lames minces (BAL-TEC RES010).

Lames classiques

- 2 Poinçonneuses pneumatiques
 - ▶ Découpage des échantillons de \varnothing 3 mm à partir d'un ruban d'épaisseur 100 μ m.
- 1 Poinçonneuse emboutisseuse
 - ▶ Découpage des échantillons de \varnothing 1 mm à partir d'un ruban d'épaisseur 100 μ m et emboutissage sur un support de 3 mm.
- Amincisseur électrolytique : STRUERS Tenupol 5
 - ▶ Echantillons \varnothing 3 mm épaisseur environ 100 μ m.

Métallographie et préparation des lames minces en froid

Labo Métallo froid

- Tronçonneuses
 - ▶ Tronçonneuse STRUERS ACCUTOM-2 : Tronçonneuse de précision.
 - ▶ Tronçonneuse BUEHLER ISOMET 1000 : Tronçonneuse de précision.
- Polisseuses
 - ▶ Polisseuse STRUERS (RotoPol 11) : Polissage automatique.
 - ▶ Polisseuse PRESI (MECAPOL 4B) : Polissage manuel (2 plateaux).
- Enrobeuse à chaud : STRUERS LaboPress-3
 - ▶ Enrobage métallographique sans retrait.



Dimpler (abrasion ionique) et amincisseur électrolytique pour préparation des lames minces en zone froide.

Les mêmes équipements sont implantés en boîte à gants blindée permettant de réaliser des lames minces sur matériaux irradiés.



Préparation des lames minces

Lames transverses

- Dimpler : EAF MODEL 2000
 - ▶ Abrasion mécanique concave sur les échantillons pour faire des lames minces (étape de préamincissement).
 - ▶ Echantillons \varnothing 3 mm, épaisseur environ 100 μm .
- Plaque chauffante : Bibby HC502
 - ▶ Collage des échantillons à la cire sur les supports "Dimpler" ou pour découpe de tronçonnage.

Lames classiques

- Amincisseur électrolytique : STRUERS Tenupol 3
- Poinçonneuse pneumatique
 - ▶ Découpe des échantillons de \varnothing 3 mm à partir de ruban d'épaisseur 100 μm .
 - ▶ Echantillons \varnothing 3 mm épaisseur environ 100 μm .

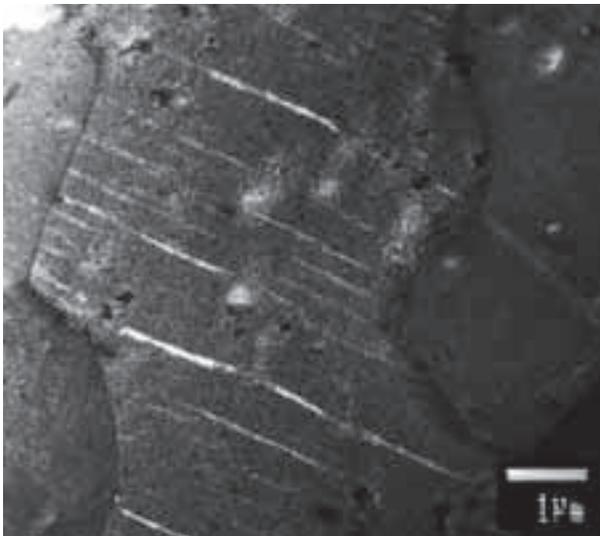
Microscopie Électronique en Transmission

MET zone nord

- Microscope FEI Tecnai 30 G2 tension d'accélération 300 kV équipé d'un système STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy) + analyseur X-EDS (EDAX).
- Caméra CCD GATAN (visualisation sur écran des images MET, STEM et des cartographies + impression).
- Pièce polaire HT (High Tilt).
- Diamètre des échantillons 3 mm.
- Porte-objets : simple tilt, double tilt, double tilt pour analyse.



Microscope Electronique en Transmission destiné à l'observation de matériaux irradiés.



Canaux de déformation basaux dans du Zy-4 irradié (fluence : $0.6 \cdot 10^{25}$ n.m⁻², soit ~1dpa).

MET bât 453

- Observation des matériaux irradiés.
- Microscope JEOL 1200EX, tension d'accélération 120 kV, équipé d'un système STEM + analyse X-EDS (LINK ISIS OXFORD).
- Diamètre des échantillons 3 mm.
- Porte-objets : simple tilt Beryllium, double tilt, double tilt pour analyse.

Electrochimie en froid

Spectroscopie d'impédance

Mesure de l'épaisseur de couches de zircon de différentes densités.

- Système d'acquisition
 - ▶ Ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition et de traitement GAMRY pour les mesures électrochimiques.
- PH-mètre
 - ▶ METERLAB PHM210.
- Conductimètre
 - ▶ METERLAB CDM210.
- Cellule de mesure
 - ▶ Alimentation de la cellule par micro-pompe WATSON MARLOW 205S équipée de 8 têtes.
 - ▶ Contre-électrode en Zircaloy (CEZUS).
 - ▶ Vis de maintien de l'échantillon (\varnothing 10 mm inox).
 - ▶ Electrode de référence au sulfate mercurieux saturé (TACUSSEL).



Autoclave situé en zone froide pour études électrochimiques.



Chaîne de mesures électrochimiques.



- ▶ PH-mètre-potentiomètre RADIOMETER PHM82.
- ▶ Solutions acide, base et tampon diluées.
- ▶ Acide : acide sulfurique concentration 10^{-2} à 10^{-5} .
- ▶ Base : potasse concentration 10^{-1} à 10^{-3} .
- ▶ Tampon : composée d'acide borique et de potasse ou de lithine dans une solution de sulfate de potassium à 10^{-2} M.

Autoclave haute pression, haute température

- Système d'acquisition
 - ▶ Ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition et de traitement GAMRY pour les mesures électrochimiques.
- Autoclave : SPG
 - ▶ Capacité 9 litres muni de 3 tubulures porte-échantillons refroidies par groupe froid LAUDA RM20.
 - ▶ Température d'utilisation 360°C sous 200 bars.
 - ▶ Mesure de pression par manomètre de contrôle SPG M115 avec limiteur de sécurité.
 - ▶ Mesure de pression d'hydrogène.

Thermobalance et autoclaves en froid

Thermobalance haute pression, haute température

- Thermobalance : Rubotherm
Système de mesure par suspension magnétique :
cellule de mesure en inconel 601.
Thermostats JULABO.
Pmax = 150 bars,
Tmax = 500°C.
Zone chauffée par le four : 200 mm pour un diamètre
de tube de l'ordre de 30 mm.
- Autoclave 1l : générateur de vapeur pour la thermobalance
Disque de rupture taré à 220 bars.
Pmax = 220 bars,
Tmax = 500°C.
- Conditions d'exploitation :
Milieux d'étude : gaz
H₂O, H₂O/Ar/H₂, H₂O/Ar/O₂, Ar/O₂.



Thermobalance située en zone froide.



Autoclave haute pression,
haute température de
volume 0.5 l.



Autoclaves haute pression, haute température

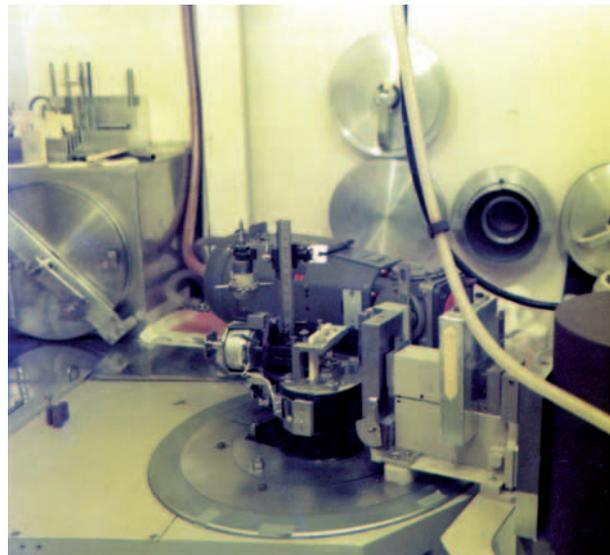
- 3 autoclaves 0,5 l :
Disque de rupture taré à 220 bars.
Milieux d'étude :
 - ▶ Milieu liquide
H₂O pur
Conditions REP (LiOH(2ppm)/H₃BO₃(1000ppm))
 - ▶ Atmosphère gazeuse :
Ar/H₂, Ar/O₂, Ar
Pmax = 220 bars,
Tmax = 450°C.
Hauteur utile : 100 mm , ø interne 80 mm.
- 1 autoclave 4 l :
Disque de rupture taré à 220 bars.
Milieu d'étude : phase gazeuse
H₂O/Ar/H₂, H₂O/Ar/O₂, H₂O/Ar.
Pmax = 220 bars,
Tmax = 450°C.
Hauteur utile : 550 mm , ø interne 100 mm.

Diffraction X

- Diffractomètre SIEMENS D500
 - ▶ Anticathode Cu.
 - ▶ Monochromateur arrière.
 - ▶ Compteur à scintillation blindé.
 - ▶ Logiciel d'acquisition et de traitement SOGABIM.
- Taille du faisceau : quelques mm²
- Caractérisations microstructurales
 - ▶ Analyse qualitative.
 - ▶ Calcul de paramètres de maille.
 - ▶ Affinement de structures.
- Nature des échantillons :
 - ▶ Tout type, massif ou poudre (combustible, métaux...).
- Taille des échantillons : (pour les échantillons massifs)
 - ▶ Minimum 15 mm x 10 mm x 0,5 mm et jusqu'à 50 mm x 50 mm x 10 mm.



Diffractomètre implanté en cellule blindée.



Microscopie Raman

Laser SPECTRA PHYSICS 4 Watt

Spectromètre JOBIN-YVON T64000 (ligne M - 2004)

- Triple monochromateur.
- Système confocale.
- Partie froide : Microscope OLYMPUS BX40.
- Partie chaude : Microscope OLYMPUS BX50 nucléarisé déporté en cellule M16 (liaisons fibres optiques).

Taille du faisceau : $1 \mu\text{m}^2$ (objectif x 100)

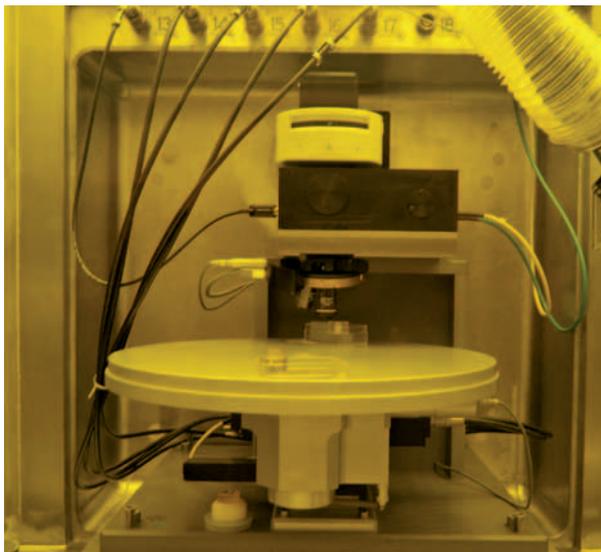
Volume analysé : $1 \mu\text{m}^3$



Microscope Raman, laser et monochromateur situés en zone froide en salle d'analyse ligne M.



Microscope Raman implanté en cellule M16 ; le microscope est relié au laser par fibre optique.



Caractérisations microstructurales

- Analyse qualitative.
- Cartographies.

Nature des échantillons

- Tous types (céramique, combustible, verre, couches de corrosion) hors métaux.

Taille des échantillons

- En froid : hauteur 50 mm.
- En chaud : maximum $\varnothing 50 \text{ mm} \times h 50 \text{ mm}$.

Microsonde électronique

Microsonde CAMECA SX50

- 4 spectromètres WDS.
- Logiciel XMAS (Société SAM'X).

Taille du faisceau : $1 \mu\text{m}^2$

Volume analysé : quelques μm^3

Caractérisations élémentaires

- Analyse qualitative (ponctuelle ou cartographie).
- Analyse quantitative (ponctuelle, ligne ou cartographie).

Nature des échantillons

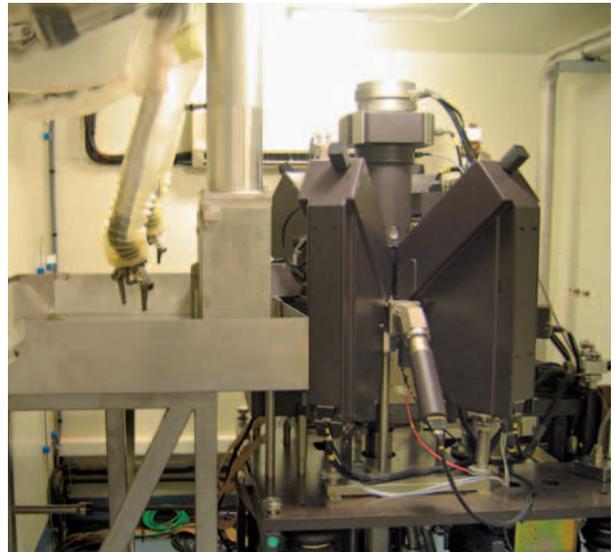
- Tout type massif : céramiques, combustible, verre, métaux.
Enrobage et polissage obligatoires.

Taille des échantillons

- 10 mm x 10 mm x 10 mm max.
- Enrobage moule \varnothing interne 20 mm (possible 40 mm).

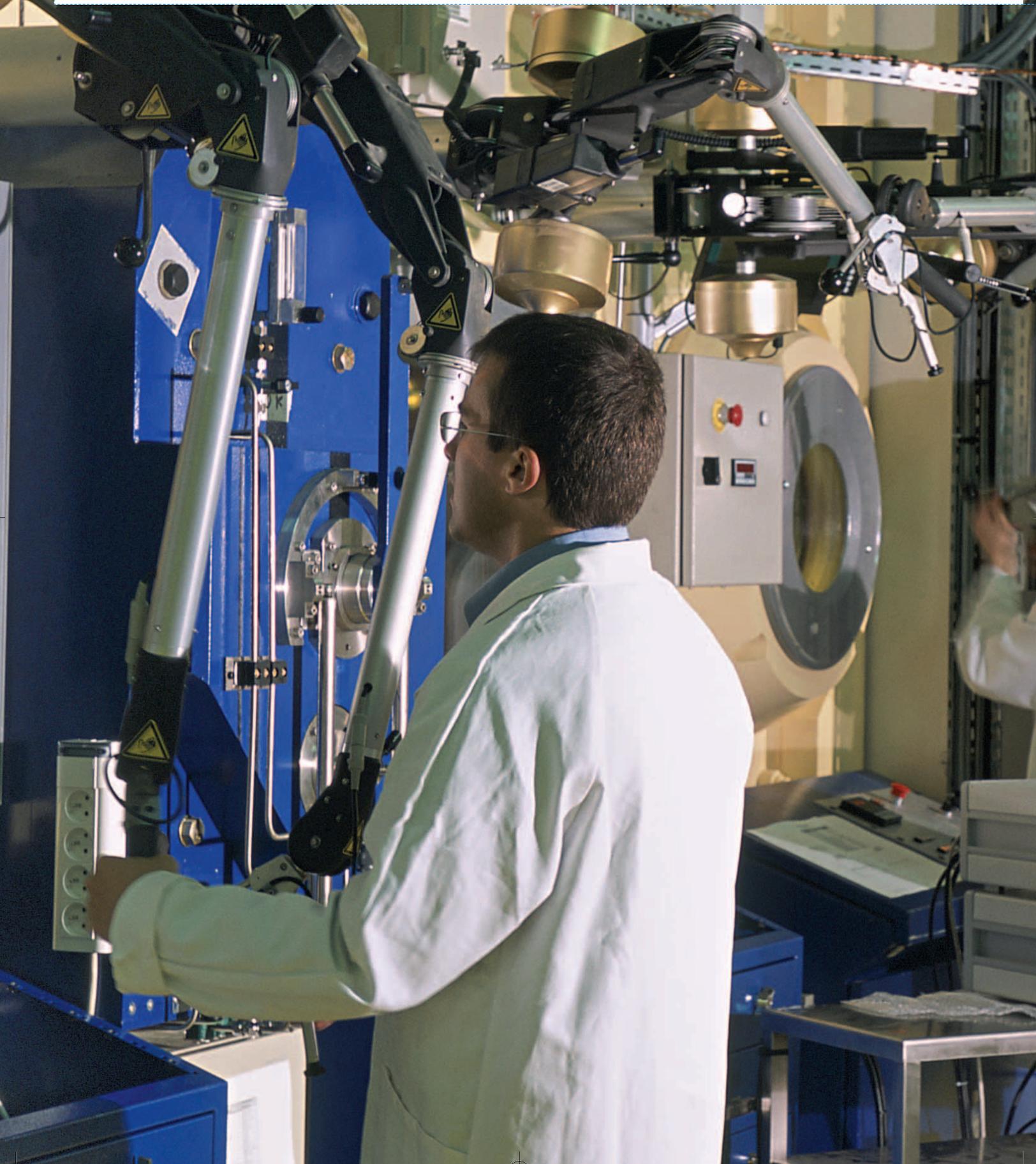


Microsonde électronique implantée en casemate blindée.



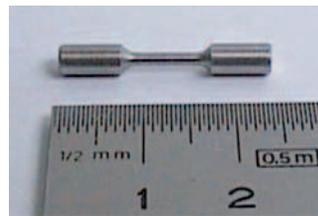
Microsonde nucléaire (hors LECI)

Accès privilégié à la microsonde nucléaire du laboratoire Pierre Süe pour effectuer des cartographies quantitatives de la distribution de l'oxygène par NRA (Nuclear reaction analysis) et de l'hydrogène par ERDA (Electron recoil detection analysis).



Caractérisation Mécanique

- 40 ••• Présentation générale des activités de caractérisation mécanique
- 42 ••• Métrologie (M02)
- 43 ••• Essais de traction statique (M03, M05)
- 44 ••• Essais de traction dynamique (M04)
- 45 ••• Essais de résilience (M10)
- 46 ••• Essais de ténacité (M09, K8)
- 47 ••• Essais de fluage et relaxation axial(e) (M20)
- 48 ••• Essais en pression interne sur gainage (M21, M23)
- 49 ••• Essais de corrosion sous contrainte par l'iode (M19)
- 50 ••• Conception de montages spécifiques par CAO
- 51 ••• Modélisation des éprouvettes spécifiques
- 52 ••• Identification de lois de comportement et d'endommagement
- 53 ••• Intégration des résultats d'essais dans des bases de données



Activités de caractérisation mécanique

L'activité de caractérisation mécanique est réalisée par le Laboratoire de Comportement Mécanique des matériaux Irradiés (LCMI). Cette activité de caractérisation comprend les essais mécaniques sur matériaux irradiés, la modélisation, l'identification mais aussi la compréhension de leur comportement et de leur endommagement. Les lois de comportement ainsi identifiées prennent en compte différents paramètres et en particulier l'effet de l'irradiation. Une fois établies et identifiées, ces lois sont intégrées dans des modules informatiques qui sont ensuite livrés en tant que briques pour les codes aux éléments finis. Cela permet une intégration des données acquises, directement réutilisable pour la simulation. Une démarche base de données est également en place pour capitaliser les essais réalisés.

Le Laboratoire est composé d'environ 25 postes permanents (14 ingénieurs, 10 techniciens et 1 secrétaire) ainsi que 2 à 4 thésards et des stagiaires.

Dans le LECl, nous occupons principalement la Ligne M et réalisons des essais mécaniques soit sur matériaux irradiés non fissiles en provenance de réacteurs expérimentaux comme le réacteur Osiris implanté sur le site de Saclay, soit sur des composants issus de réacteurs industriels pour expertise. Nous travaillons principalement dans un cadre français régi par des accords de collaboration (bi ou tripartites) avec EDF, AREVA-NP et NC, IRSN, Défense. Cependant, la part de travaux dans un cadre international croît vite et régulièrement et nous avons des contrats avec l'EPRI, l'Union Européenne, la Russie et d'autres organismes ou états.



Recherche d'un échantillon particulier dans l'enceinte de stockage M08.



Un télémanipulateur vu depuis l'intérieur d'une enceinte blindée.



Les activités maximales admissibles dans les enceintes blindées au plomb sont en général de 10^{13} Bq en terme d'équivalent ^{60}Co pour la plupart des enceintes blindées en Ligne M. Du fait de cette nouvelle ligne M, mise en chaud le 19 octobre 2005, nous disposons de machines d'essais et de moyens récents datant pour la plupart de 2004. Cependant, l'expérience acquise est beaucoup plus longue et de nombreux techniciens ont 25 à 30 ans d'expérience. Ils ont de ce fait participé à la conception et la réception de la nouvelle ligne et des machines.

Les matériaux testés sont principalement des alliages métalliques issus des réacteurs industriels et expérimentaux actuels : acier de cuve, aciers inoxydables de structures internes, aciers austéno-ferritiques, alliages de zirconium, alliages d'aluminium. Nous testons également des matériaux comme le graphite pour le démantèlement des réacteurs UNGG et dans un proche avenir pour les réacteurs de 4^{ème} génération. Des développements sont en cours pour des essais sur matériaux céramiques (non fissiles) et composites.



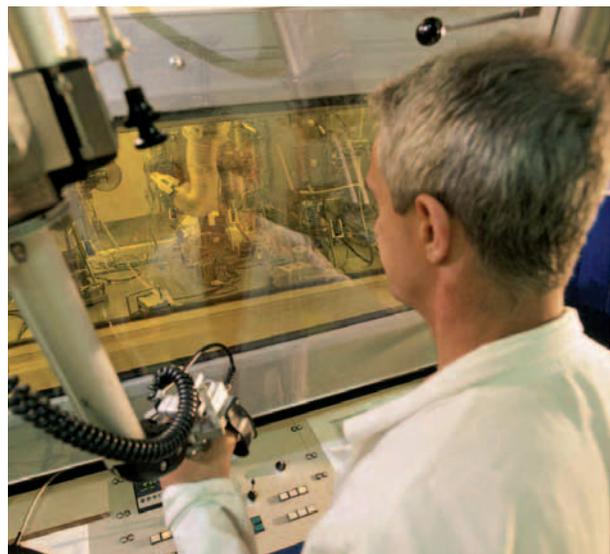
Installation d'une tige d'amarrage pour une opération d'étalonnage.



Vue depuis l'intérieur de l'enceinte blindée de fluage axial (M20).

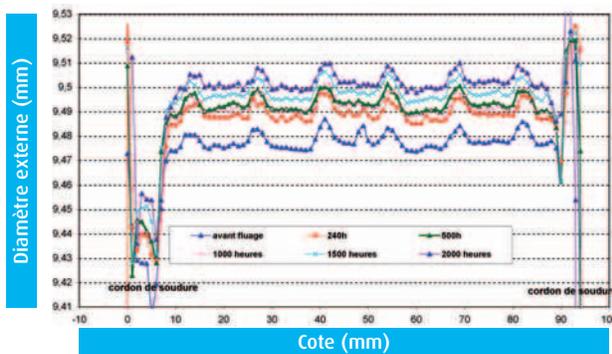


Face à l'enceinte de fluage par pression interne, l'opérateur règle le positionnement des extensomètres diamétraux.



Métrologie (M02)

La métrologie est utilisée de façon générale dans le laboratoire, en particulier pour connaître la section des éprouvettes et ainsi accéder aux valeurs de contraintes à partir des mesures de force ou de pression. Cependant, nous avons développé également des moyens de métrologie de précision pour assurer le suivi de la croissance ou du fluage sous irradiation. Dans ce cas, les éprouvettes sont chargées mécaniquement (e.g. tubes pré-pressurisés ou lames

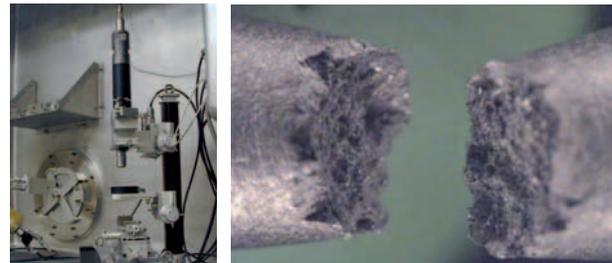


Exemple d'application dans le cadre des études sur l'entreposage à sec

Profils de diamètres sur des tubes en Zircaloy-4 irradiés 4 cycles chargés par pression interne de gaz et soumis au fluage thermique.

en flexion), envoyées en réacteur expérimental (Osiris), mesurées hors du réacteur dans notre laboratoire puis elles reviennent en réacteur pour poursuivre l'irradiation. Ces allers-retours sont réalisés jusqu'à l'obtention de la dose visée et du nombre adéquat de mesures dimensionnelles pour déterminer la cinétique de fluage sous irradiation. Il en est de même pour déterminer la cinétique de croissance sous irradiation.

L'enceinte M02 est une enceinte double (deux hublots) qui comporte plusieurs appareils de métrologie de précision.



Banc optique macroscopique (Optique Peter)

Ce banc optique permet de mesurer la striction à rupture et la propagation de fissure sur éprouvettes de mécanique de la rupture, ou toute autre mesure optique. L'autre photo correspond à un exemple de rupture sur éprouvette de traction cylindrique.



Système de mesure optique de contour (Hommel)

Ce système optique opérant dans l'ultraviolet permet la vérification dimensionnelle des usinages réalisés en enceinte blindée. Mais, c'est aussi ce système qui permet les mesures de croissance et de fluage sous irradiation.



Métrologie par nappe laser (Z-Mike)

Mesure de profils pour des pièces de révolution ou sur des lames de relaxation mises sous irradiation.

Essais de traction statique (M03, M05)

L'essai de traction est l'essai le plus demandé par les clients et par voie de conséquence le plus pratiqué. Pour répondre à ce besoin, nous avons 3 machines d'essais en traction/compression avec des capacités en charge et déplacement étagés et des possibilités différentes. Les deux premières présentées ici sont les machines de traction électromécaniques. La troisième est une machine hydraulique de traction dynamique, décrite à la page suivante.

La première machine statique, dite de mini traction, est située en enceinte M03. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Déplacement traverse de course maximale 200 mm.
- Cellules de charge : 10 kN et 5 kN.
- Vitesse de déplacement : 500 mm/mn à 0,001 mm/mn.
- Température par système à deux coquilles : -150°C à 600°C.
- Atmosphère : Air ou balayage Argon.
- Pilotage et Logiciel : INSTRON 8800+, Bluehill, Ténacité.
- Caméra permettant de filmer par un hublot obturable.
- Types d'échantillons : traction sur petites éprouvettes (longueur de jauge 5 mm), Small Punch Test, essai de flexion sur éprouvettes Mini Charpy pré-fissurées.



Vue de la machine de Traction Standard située en enceinte M05.

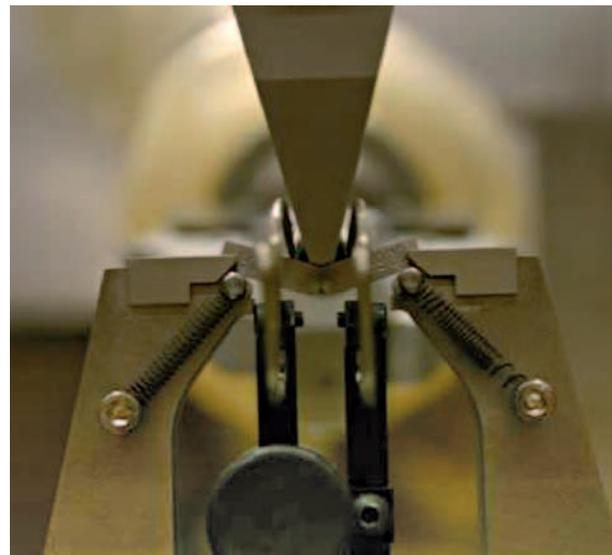
La seconde machine statique, dite de traction standard, est située en enceinte M05.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Vérin électromécanique de course maximale ± 100 mm.
- Cellules de charge : 50 kN et 5 kN.
- Vitesse de déplacement : 0,5 mm/s à 1 μ m/h.
- Extensomètres axial et diamétral mécaniques à tiges céramiques.
- Température par système à deux coquilles : -150°C à 1000°C.
- Atmosphère : Air ou balayage Argon.
- Pilotage et Logiciel : Instron 8800+, Bluehill.
- Caméra permettant de filmer par un hublot obturable.
- Système d'auto-alignement de la tige d'amarrage (AlignPro).
- Types d'échantillons : traction standard de 10^{-4} à 10^2 s⁻¹ et traction lente jusqu'à 10^{-7} s⁻¹.



Essai de Flexion à température ambiante sur éprouvette Mini Charpy sur la machine (M03).



Essais de traction dynamique (M04)

La machine de traction dynamique est une machine hydraulique avec accumulateur. Elle permet de réaliser des essais de traction à vitesse de déformation intermédiaire, comprise dans le domaine de quelques dizaines de s^{-1} en fonction de la géométrie de l'éprouvette testée (L0).

Les essais réalisés sur cette machine visent à couvrir les situations accidentelles de type RIA ou APRP pour le matériau de gainage. Dans ces cas particuliers, la température s'élève très rapidement jusqu'à des valeurs importantes (900°C), conduisant normalement en stationnaire à la restauration des défauts d'irradiation.

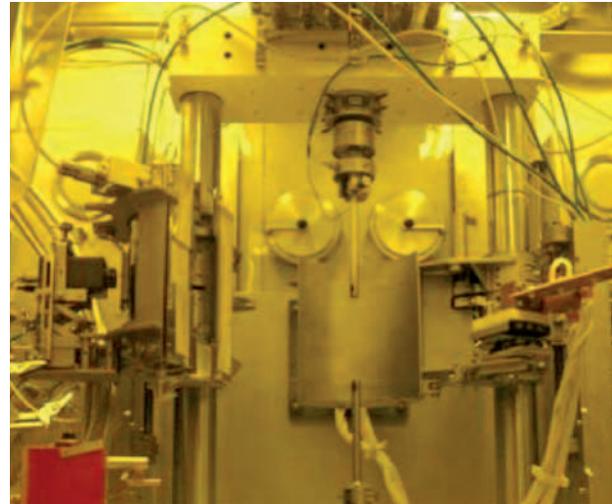
Dans les conditions transitoires explorées, les défauts d'irradiation n'ont pas le temps de se restaurer et il importe alors de connaître les propriétés mécaniques de la gaine pendant ces transitoires. Afin de s'affranchir d'effets de restauration des défauts d'irradiation, l'enceinte M04 est équipée de moyens de chauffage rapide à induction ou effet Joule qui permettent d'atteindre des vitesses de montée en température de l'ordre de la centaine de degrés par seconde. C'est le cas avec le projet PROMÉTRA (PROpriétés MÉcaniques en TRANSitoire) qui vient en soutien des essais RIA réalisés dans le réacteur CABRI à Cadarache.



Spires d'induction entourant l'éprouvette de type anneau sur gaine.



Vue de la machine de traction dynamique située en enceinte M04.



Cette machine de traction dynamique est située en enceinte M04. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Vérin hydraulique avec accumulateur de course maximale ± 50 mm.
- Cellules de charge : 25 kN et 5 kN,
- Vitesse de déplacement : 500 mm/s à 0,0015 mm/s.
- Extensomètres axial et diamétral mécaniques à tiges céramiques.
- Température par système à deux coquilles : 25°C à 1 000°C.
- Chauffage rapide par induction ou effet Joule : 1 200°C à 500°C/s.
- Atmosphère : Air ou balayage Argon.
- Pilotage et Logiciel : Instron 8800+, WaveMaker.
- Caméra permettant de filmer par un hublot obturable.
- Système d'auto-alignement de la tige d'amarrage (AlignPro).
- Types d'échantillons : traction standard de 10^{-4} à $10^{-2} s^{-1}$ et traction rapide jusqu'à $10^{+2} s^{-1}$.

Essais de résilience (M10)

L'essai de résilience (aussi appelé essai Charpy) permet d'évaluer la résistance à la rupture des matériaux et permet de déterminer la température de transition fragile-ductile. L'enceinte blindée M10 comporte deux moutons pendules de capacités différentes. L'un standard, de capacité 300 Joule, permet de tester les éprouvettes de résilience (notamment 10 x 10 x 55 mm). L'autre permet de tester des éprouvettes plus petites (notamment 3 x 4 x 27 mm) et est désigné par Mini-Charpy.

Les caractéristiques principales de ces moutons

pendules sont les suivantes

- Énergie et vitesse maximales : 300 J et 5,12 m/s.
- Gamme de températures d'essai : -150°C à +600°C.
- Alimentation et positionnement automatique par système pneumatique.

Essai Charpy Conventionnel (300 J)

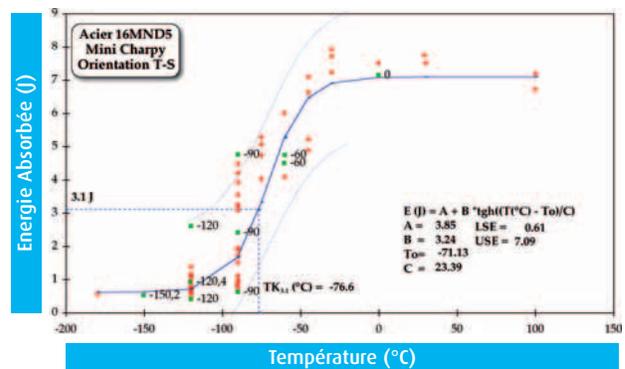
Préparation du premier essai de résilience Charpy-V sur matériau irradié le 19 octobre 2005 lors de la mise en chaud de la ligne M.



- Mouton complètement instrumenté : force, déplacement et angle en cours d'impact.
- Types d'échantillons : Charpy-V ou U de dimensions 10 x 10 x 55 mm ou réduites.



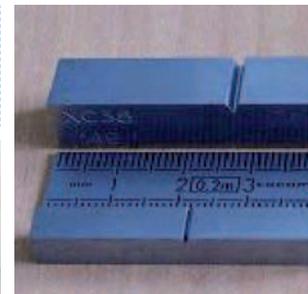
Exemple de courbe de transition en résilience obtenue sur le mouton pendule de 50 Joule pour l'acier de cuve 16MND5 à l'état non-irradié.



- Énergie et vitesse maximales : 50 J et 3,7 m/s.
- Gamme de températures d'essai : -150°C à +600°C.
- Alimentation et positionnement automatique par système pneumatique.
- Mouton complètement instrumenté : Force, déplacement et angle en cours d'impact.
- Types d'échantillons : Sub-Size Charpy-V de dimensions 3 x 4 x 27 mm ou 3.3 x 3.3 x 24 mm.



Vue depuis l'intérieur de l'enceinte du mouton pendule de 300 Joule.



Éprouvettes de résilience couramment testées sur le mouton pendule de 300 Joule.

Essais de ténacité (M09, K8)

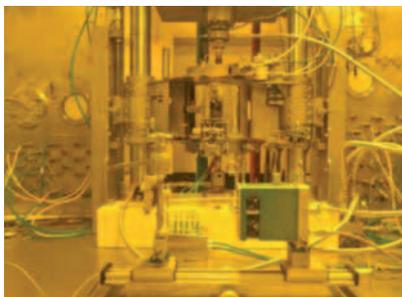
L'essai de ténacité permet de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture fragile ou à la déchirure ductile. Il va plus loin que l'essai de résilience car il permet d'obtenir des caractéristiques comme le K_{IC} et le J_{IC} qui sont directement utilisables pour les calculs d'intégrité de structures.

Le laboratoire s'est doté pour ces essais de deux machines hydrauliques de capacité maximale différente (100 kN et 250 kN). Les éprouvettes de ténacité utilisées sont en général de type CT (Compact Tension) comme celle en photo ci-jointe. Les éprouvettes irradiées en réacteur expérimental sont usinées et pré-fissurées en froid avant l'irradiation. En revanche, s'il s'agit d'un bloc irradié, les éprouvettes doivent être usinées puis pré-fissurées sur machine hydraulique en enceinte blindée.

Les caractéristiques principales de ces machines hydrauliques sont les suivantes

Machine située en enceinte M09 :

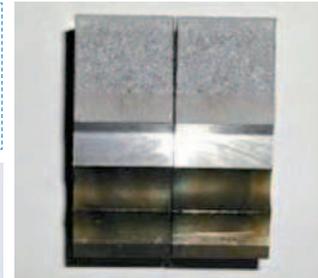
- Vérin hydraulique avec une course maximale de ± 75 mm.
- Cellules de force : 100 kN et 25 kN.
- Vitesse de déplacement vérin : 0,5 mm/s à 1 μ m/h.
- Gamme de température : -150°C à +1 000°C.
- Extensomètre axial mécanique à tiges céramiques.
- Extensomètre type COD à bras courts ou longs.
- Atmosphère : Air ou balayage Argon.
- Pilotage et Logiciel : Instron 8800+, Ténacité K_{IC} et J-da, da/dN, Bluehill.



Vue de l'intérieur de l'enceinte M09 avec son enceinte chaud-froid et le bâti de 100 kN.



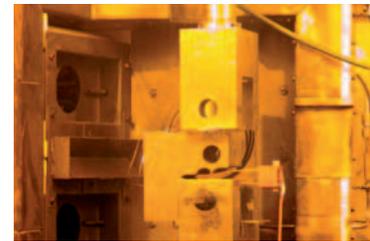
Éprouvette de ténacité de type CT (Compact Tension) rainurée pour les essais en J.



Éprouvette CT 20 rompue en deux parties en rupture fragile prête pour mesure de la longueur de fissure de fatigue.



Éprouvette de ténacité de type CT 50 montée avec un capteur à lames dans l'enceinte chaud froid sur la machine K8.



- Caméra permettant de filmer par un hublot obturable.
- Système d'auto-alignement de la tige d'amarrage (AlignPro).
- Types d'échantillons : CT 10 à CT 25, CTR5 et essai de flexion sur éprouvette pré-fissurée de type Charpy.

Machine située en enceinte K8 :

- Vérin hydraulique avec une course maximale de ± 75 mm.
- Cellules de force : 250 kN et 25 kN.
- Vitesse de déplacement vérin : 0,5 mm/s à 1 μ m/h.
- Gamme de températures : -150°C à +600°C.
- Extensomètre axial mécanique à tiges céramiques,
- Extensomètre type COD à bras courts ou longs.
- Atmosphère : Air.
- Pilotage et Logiciel : Instron 8800+, Ténacité K_{IC} et J-da, da/dN.
- Types d'échantillons : CT 12,5 à CT 50 et portion de structures (e.g. flambage latéral de grilles d'assemblages combustibles).

Essais de fluage et relaxation axial(e) (M20)

L'essai de fluage est toujours réalisé en température en maintenant un niveau de charge constant et en mesurant la déformation au cours du temps. Ces essais sont réalisés très souvent pour déterminer les conditions de fluage négligeable, de façon à pouvoir bien dimensionner les structures ou garantir qu'elles ne se déforment pas par fluage.

Compte tenu de l'instrumentation en extensométrie axiale, il est également possible de réaliser des essais de relaxation durant lesquels la déformation totale est maintenue constante. Ainsi, la contrainte diminue en fonction du temps. Cela apporte des informations concernant la tenue des composants et l'évolution des contraintes en cas de déformation imposée à une structure.

Les caractéristiques principales de ces machines électromécaniques sont les suivantes

- Vérin électromécanique avec une course maximale de ± 50 mm.
- Cellules de force : 50 kN et 5 kN.
- Vitesse de déplacement vérin : 0,5 mm/s à 1 μ m/h.
- Gamme de températures : +50°C à +800°C.
- Extensomètre axial et diamétral mécaniques à tiges céramiques.
- Atmosphère : air ou balayage argon.
- Pilotage et Logiciel : Pilotage Rubicon, fluage-relaxation DMG.
- Types d'échantillons : traction plate ou cylindrique, tube de gainage.

Extensomètres mécaniques adaptés aux laboratoires chauds

De nouveaux extensomètres pour les essais de traction ou fluage axial sont utilisés en ligne M du LECL. Ils ont subi avec succès des séries de tests et modifications. C'est un aspect nouveau par rapport à l'ancien laboratoire (LHA) où tous les essais en traction étaient réalisés sans extensomètre avec le déplacement vérin ou traverse des machines et correction de complaisance. Cela devrait conduire à l'amélioration de la précision de nos mesures.

Ces extensomètres permettent de mesurer la déformation axiale ou diamétrale d'éprouvettes sollicitées lors d'essais mécaniques aussi bien à température élevée (jusqu'à 1 000°C) qu'à la température de l'azote liquide (-160°C). Ils sont utilisés pour les essais de traction, de fluage ou de relaxation uniaxiale.

La mise en œuvre de ces extensomètres à l'aide de bras télémanipulateurs a nécessité de nombreuses adaptations tant de la part du fabricant (Maytec GmbH) que des expérimentateurs du LCMI. Il s'agissait notamment d'assurer un positionnement précis et stable des tiges de céramiques sur les éprouvettes. Ceci a été rendu possible par l'utilisation de platines micrométriques sur le support des extensomètres. Il fallait également pouvoir changer les tiges céramiques à l'aide des bras télémanipulateurs sans endommager le délicat dispositif mécanique qui relie celles-ci au capteur LVDT. Pour ce faire, un dispositif spécial en alliage d'aluminium a été conçu et usiné.



Tiges en céramique au contact d'un tronçon de gaine sollicité en sens axial.

Essais en pression interne sur gainage (M21, M23)

Dans les réacteurs de type REP, REB ou RNR, le gainage correspond au tube contenant les pastilles de combustible. C'est une paroi importante qui assure la fonction de première barrière de confinement entre le combustible et le fluide caloporteur du circuit primaire. Les matériaux utilisés sont des alliages de zirconium ou des aciers. L'objectif des essais que nous réalisons sur gaines irradiées est de vérifier le comportement de ce matériau et d'évaluer son évolution avec l'irradiation. L'augmentation des taux de combustion des combustibles pour une meilleure exploitation de la matière fissile conduit aussi à des doses plus importantes pour le gainage ainsi qu'à des endommagements par oxydation et corrosion dont il faut se prémunir.

Les essais réalisés consistent à imposer une pression interne au tronçon de tube fermé par des bouchons Swagelock ou des extrémités soudées. Les essais que l'on peut réaliser sont de plusieurs types : éclatement, fluage, relaxation, fatigue oligocyclique, biaxé.



Machine d'essai bi-axée en pression d'huile située en M21.



Pour cela, le laboratoire dispose de deux installations en enceintes M21 et M23.

La première en M21 est une machine biaxée qui, avec la pression d'huile (max. 2 000 bars) permet de tester l'éclatement ou la fatigue. La sollicitation axiale, par le biais d'une machine de traction compression (50 kN), permet de jouer sur l'effet de fond du tube en le compensant ou au contraire en l'accroissant. L'utilisation d'huile limite la température maximale d'essai à 400°C.



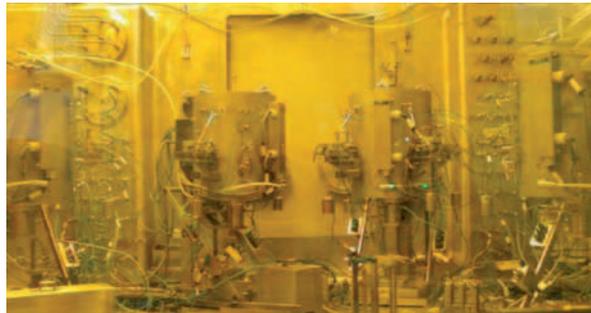
Éprouvette tubulaire raccordée aux tiges d'amarrage par un système Swagelock.



La seconde installation située en enceinte M23 comporte quatre fours de fluage par pression interne de gaz (Argon) jusqu'à 1 000 bars. L'utilisation d'un gaz permet de fonctionner jusqu'à 700°C. Cette installation est utilisée pour les essais de fluage ou de relaxation.



Four de fluage par pression interne de gaz et son instrumentation en déformation diamétrale.



Vue de deux fours de fluage par pression interne de gaz en enceinte M23.

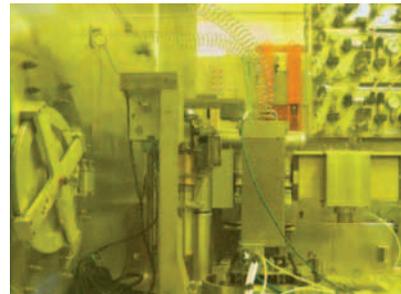
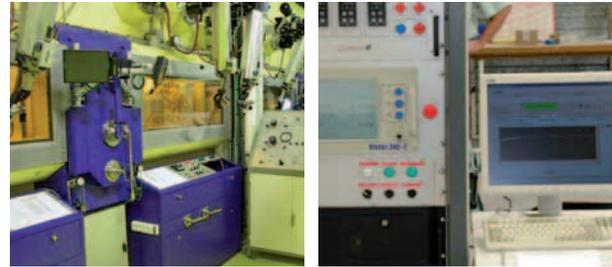


Essais de corrosion sous contrainte par l'iode (M19)

Lors du fonctionnement des réacteurs à eau pressurisée, toute augmentation de puissance s'accompagne d'une élévation significative de la température du combustible. La mauvaise conductivité thermique du combustible induit un gradient de température décroissant depuis le centre de la pastille de combustible vers les bords, qui conduit à la mise en diabolo de la pastille et à sa fissuration radiale. La mise en diabolo de la pastille est à l'origine d'une déformation importante de la gaine au niveau des plans inter-pastilles. D'autre part, suivant le taux de combustion déjà atteint, une quantité plus ou moins importante de produits de fission (iode, césium) stockés dans le combustible peut être relâchée. Dans cette situation où le comportement des pastilles de combustible interagit avec celui de la gaine (Phénomène d'IPG : Interaction Pastille Gaine), les effets synergiques de la déformation et



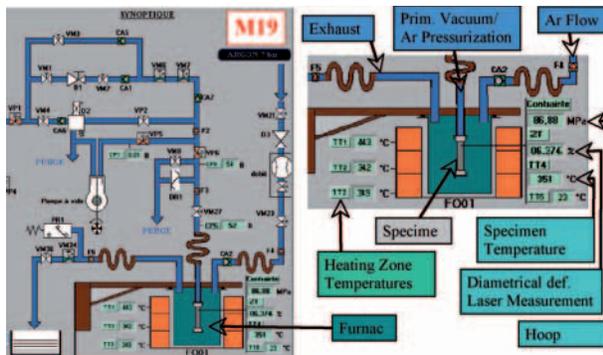
Vue de l'enceinte blindée M19 depuis la zone avant et son pupitre de pilotage.



Dispositif de corrosion sous contrainte par l'iode en enceinte M19.



Synoptique de fonctionnement de la machine de CSC-I.



Éprouvette tubulaire équipée de Swagelock et de thermocouples.

du processus de corrosion par l'iode peuvent conduire à une rupture de la gaine par corrosion sous contrainte (CSC-I).

Le dispositif implanté en enceinte blindée M19 permet d'effectuer des essais de corrosion sous contrainte par pressurisation jusqu'à 100 MPa et à des températures allant jusqu'à 600°C en atmosphère iodée sur des portions de gaine combustible dépastillées de 90 à 135 mm de long.

Les essais de corrosion sous contrainte peuvent être conduits selon 2 modes d'asservissement

- Asservissement sur la pression avec possibilité d'effectuer des chargements complexes incluant des rampes positives ou négatives et des maintiens.
- Asservissement sur la déformation via une mesure laser du diamètre extérieur des échantillons. Ce mode permet la réalisation d'essais d'écroutissage-relaxation, plus représentatifs de la sollicitation imposée par la pastille sur la gaine en conditions d'IPG.

Les modes d'amorçage et rupture sont ensuite étudiés au MEB afin d'établir avec certitude l'origine de la fissuration.

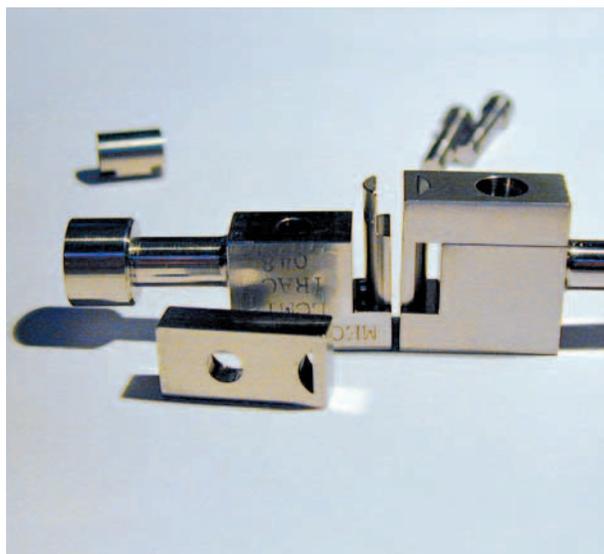
Conception de montages spécifiques par CAO

Les montages d'essais employés au laboratoire sont aujourd'hui de plus en plus complexes. Cette complexité résulte éventuellement de la géométrie des échantillons testés, bien souvent des échantillons de petites dimensions permettant de maximiser le nombre de résultats expérimentaux susceptibles d'être obtenus pour un volume donné de matière irradiée. Aussi, la qualité des résultats expérimentaux nécessite de maîtriser le plus parfaitement possible les conditions aux limites appliquées aux échantillons. Ces contraintes nécessitent l'utilisation d'outils de Conception Assistée par Ordinateur. Pour cela, le laboratoire est équipé de deux stations de travail et du logiciel de Conception Assistée par Ordinateur Solidworks de la société Cadware.

Les éléments constituant les montages sont de meilleure conception et le logiciel permet de visualiser et d'optimiser la télé-manipulabilité des pièces en enceinte blindée. Il permet en outre de concevoir des pièces complexes, bien souvent usinées par électroérosion.



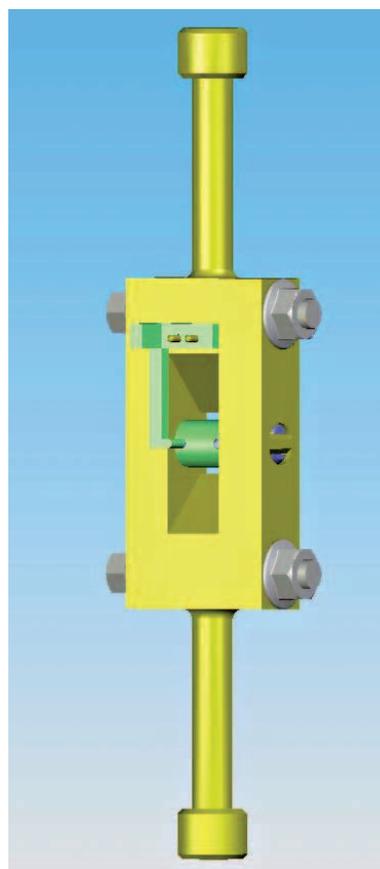
Montage de traction de l'éprouvette PSU après fabrication et en cours de montage.



Anneau de type Penn State University (Øe=9,5mm, L=12mm).



Montage d'essais pour anneau de type Penn State University.



Modélisation des éprouvettes spécifiques

La modélisation aux éléments finis des essais réalisés au laboratoire est une étape indispensable à la compréhension des résultats expérimentaux obtenus.

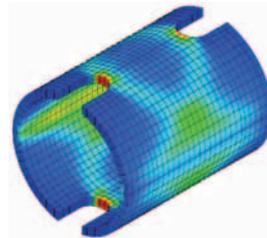
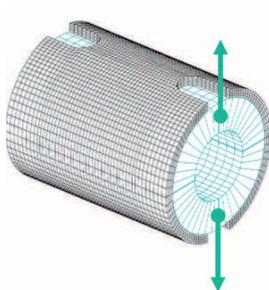
La confrontation entre résultats expérimentaux et résultats de calcul permet :

- de mieux appréhender des effets de structure qui doivent être pris en compte lorsque l'on étudie le comportement mécanique des matériaux (modélisation du contact frottant, des conditions aux limites, effets dynamiques, etc...),
- de vérifier les hypothèses utilisées lors de la conception des essais (homogénéité ou gradients des contraintes et déformations, validité des résultats par rapport aux normes d'essais),
- de concevoir et de tester des essais nouveaux, permettant de mieux représenter les sollicitations vues en réacteur (bi-axialité des chargements, éprouvettes multi fonctionnelles),
- de faire évoluer les modèles, les géométries d'éprouvettes ou les protocoles expérimentaux lorsque l'accord essai calcul n'est pas satisfaisant.

La modélisation est réalisée à l'aide du code aux éléments finis CAST3M du CEA développé au DM2S/SEMT/LM2S.



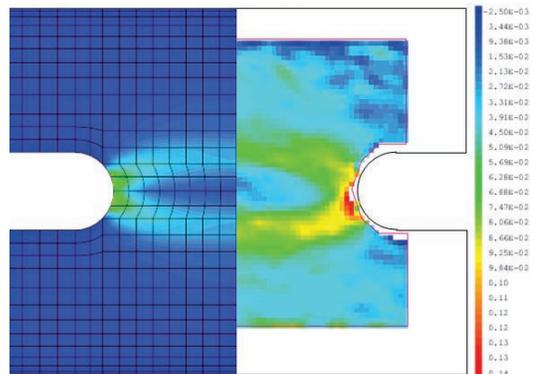
Maillage 3D de l'anneau Penn State University.



PSU distribution déformation plastique.



Comparaison essai/calcul de la déformation circonférentielle mesurée par corrélation d'images et calculée (calcul 3D CAST3M).

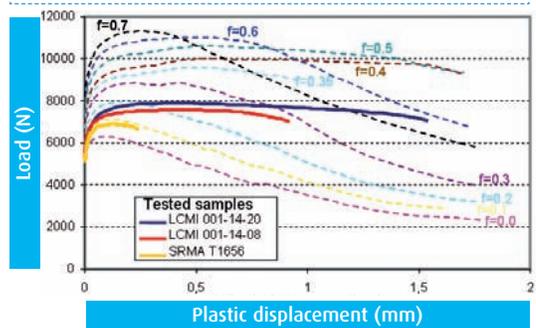


Déformation calculée

Déformation mesurée



Modélisation des effets du contact frottant lors d'un essai Penn State University et confrontation à l'expérience.



Plastic displacement (mm)

Identification de lois de comportement et d'endommagement

Les essais mécaniques réalisés dans différentes conditions (températures, contraintes...) forment des bases qui peuvent être utilisées pour identifier les paramètres de lois de comportement de type équations constitutives. Ces lois et les coefficients associés à la base d'essais sont ensuite utilisés dans des calculs par éléments finis permettant d'évaluer la réponse thermomécanique des structures et dans certains cas leur endommagement. Le laboratoire a également développé une compétence forte dans ce domaine et va jusqu'à l'implémentation des lois de comportement dans des modules informatiques, qui peuvent ensuite être directement raccordés aux codes de calculs par éléments finis. C'est notamment le cas, en particulier pour les matériaux de gainage, où le module MISTRAL® est depuis longtemps développé dans le laboratoire et livré pour être utilisé par différents codes. Le jeu de coefficients identifié pour une base d'essais particulière n'est, quant à lui, livré qu'au client concerné.

Exemple relatif à un modèle de fluage en pression interne des gaines en Zircaloy-4 détendu pour l'entreposage de longue durée des combustibles usés :

Pour prédire le comportement de la gaine du crayon combustible en entreposage, on a établi un modèle de déformation à partir d'une base expérimentale comprenant 103 essais de fluage en pression interne réalisés sur des gaines en Zircaloy-4 détendu ancien standard, et Zircaloy-4 bas étain, non irradiées et irradiées de 1 à 5 cycles en REP :

- à des températures comprises entre 310 et 470°C,
- pour des contraintes comprises entre 80 et 250 MPa,
- de durées inférieures ou égales à 208 jours pour le matériau irradié et 666 jours pour le matériau non irradié.

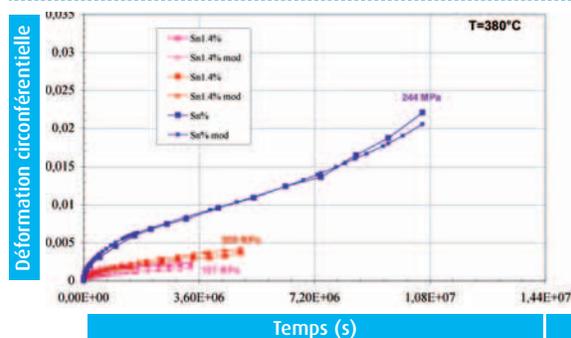
Ce modèle de déformation viscoplastique décrit l'adoucissement du matériau sous l'effet de la restauration de l'écroissage et du durcissement d'irradiation. Deux jeux de paramètres correspondant aux 2 nuances de Zircaloy-4 ont été identifiés.

On constate un bon accord entre le modèle et l'expérience pour le matériau non irradié. Le durcissement d'irradiation est globalement correctement reproduit par le modèle. Alors qu'on constate un bon accord entre la nouvelle et

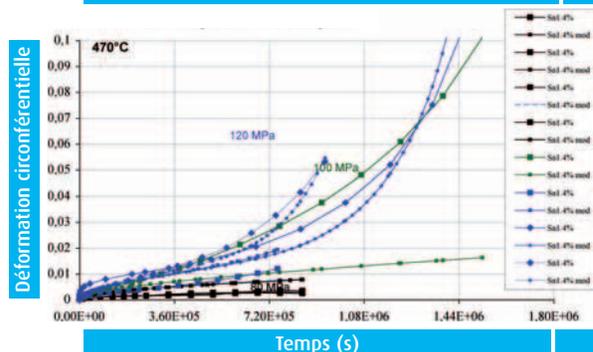
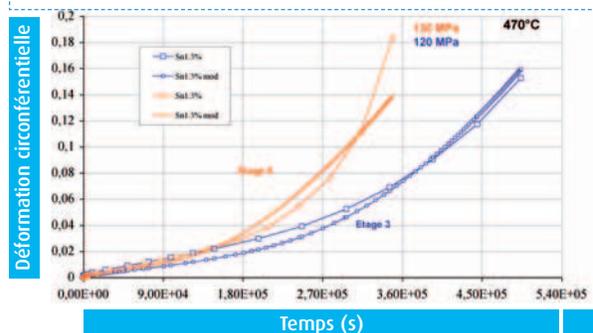
l'ancienne formulation du modèle pour les faibles déformations (<1%), l'accélération précoce de fluage observée sur certaines éprouvettes est nettement mieux décrite par la nouvelle formulation, qui ne peut toutefois rendre compte de la dispersion expérimentale parfois significative.



Comparaison du modèle aux essais réalisés 380°C sur Zy-4 ancien standard irradié 4 cycles.



Comparaison du modèle aux essais réalisés à 470°C sur Zy-4 X1 1^{ère} phase et ancien standard irradié 4 cycles.



Intégration des résultats d'essais dans des bases de données

La capitalisation des essais réalisés sur matériaux irradiés passe par le stockage des résultats et des conditions d'essais dans des bases de données. Cela permet à la fois d'archiver et aussi de mettre à la disposition des membres du personnel mais aussi des équipes projets les résultats des essais relatifs aux programmes pour lesquels ils ont un droit d'accès.

Les fichiers bruts issus des essais sont stockés sur des zones en réseau et infogérées avec des sauvegardes

régulières. Ces fichiers sont ensuite repris et traités à l'aide de macro sous Excel pour être exploités et extraire ainsi les informations classiques issues des différents essais mécaniques. Il en est de même pour la préparation à l'entrée des données dans les bases de données. En effet, il faut adapter les données (changement d'ordre, d'unités, calculs...) et les compléter (e.g. données de dose d'irradiation, information programme...) avant de pouvoir importer les résultats d'essais dans une base de données. Le fait de travailler sous Excel permet aux différents membres du laboratoire de maîtriser l'évolution et les modifications.

→
Ecran de mise en correspondance entre les champs d'un fichier d'essai de traction et ceux de la base de données.

Traction statique uniaxiale - Uniaxial Tensile

Champs fichiers essais	Champs Alloys-DB
-champs- specimen identifier test control température d'essai	-champs- specimen identifier test control test temperature (°C) displacement rate 1 (m/s) strain rate 1 (1/s) reference to report
vitesse de déformation s-1 reference to report	test date
date de l'essai	data tested by date of data entry data entered by
data tested by date d'entrée des données données entrées par	tensile strength (MPa) yield strength (MPa) elongation after fracture (%) uniform elongation (%) reduction of area (%) 0.1% proof strength (MPa) 0.2% proof strength (MPa) 0.5% proof strength (MPa) test standard test remark Fracture (yes or no) test machine
Rm yield strength MPa déformation après rupture déformation uniforme	-graphe- Strain (eng.) [%] Stress (eng.) [MPa] Strain (true) [%] Stress (true) [MPa] Load [N] Transv. strain (eng.) [%] Time (s) Curve notes
Rp0.1 Rp0.2 Rp0.5	
rupture (yes or no) machine d'essai -graphe- déf. conv. % contrainte conv MPa	

Champ
Champ Alloys-DB : test date
Champ fichier essai : date de l'essai
Nom...

Données dans un fichier
Fichier : K8_33r-K8_36r.csv

Onglet : RESTRAC
Position du champ : C7
Formule : =TEXT(DAY(champ),"0") & "/" & CHOOSE (MONTH
1:JANUARY 2:FEBRUARY 3:MARCH 4:APRIL 5:MAY 6:JUNE 7:JULY 8:AUGUST 9:SEPTEMBER 10:OCTOBER 11:NOVEMBER 12:DECEMBER)

Position du champ Appliquer une formule

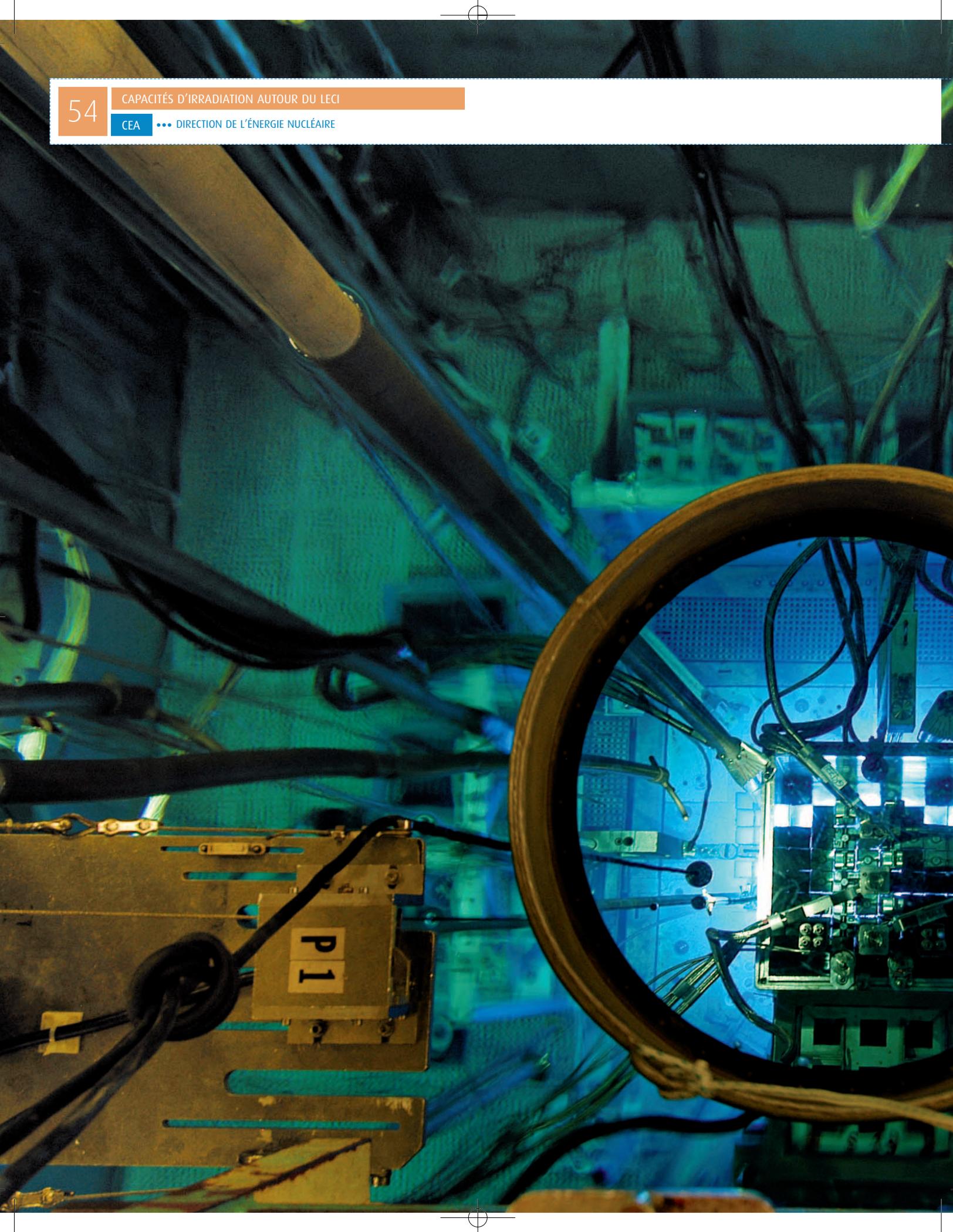
Nom de fichier

fichier source secondaire

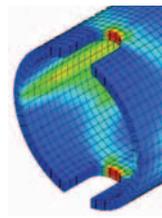
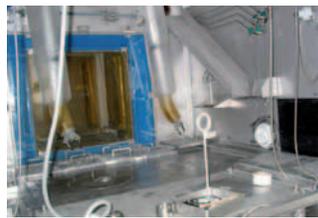
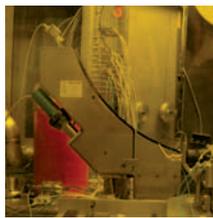
Valeur

Opérations graphe

Précédent... Aperçu Sauver... Quitter



CAPACITÉS D'IRRADIATION AUTOUR DU LECl

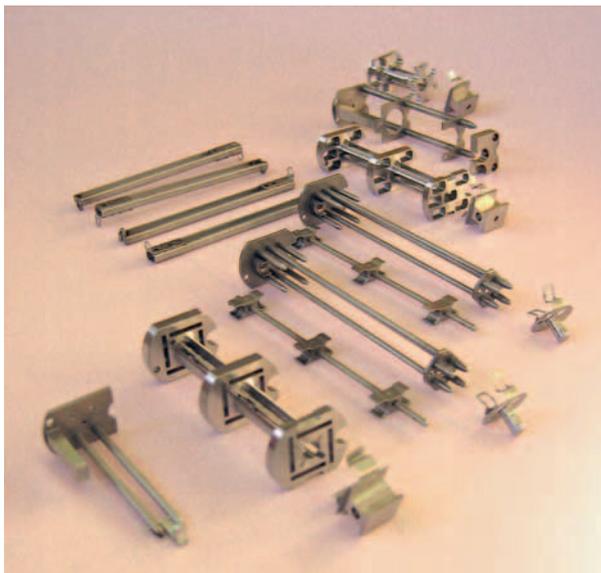


Le LECl procède à des expertises ou à des examens post irradiatoires pour un grand nombre de réacteurs expérimentaux, de réacteurs de propulsion ou de puissance, mais il bénéficie également de la proximité d'OSIRIS pour pouvoir mener à bien des programmes de R&D comprenant des irradiations expérimentales.

OSIRIS est un réacteur expérimental d'une puissance thermique de 70 MWth implanté sur le centre CEA de Saclay. C'est un réacteur de type piscine à eau légère et à cœur ouvert dont le but principal est d'irradier, sous haut flux de neutrons, des éléments combustibles et des matériaux de structures des centrales électronucléaires de puissance. Il sert également à produire des radioéléments et du silicium dopé. Le cœur du réacteur est constitué de 38 éléments combustibles et de 6 éléments de commande dont le taux d'enrichissement en uranium 235 est de 19,75% .



Paniers porte-échantillon pour une irradiation en cœur d'OSIRIS.



Chargement d'une éprouvette de fluage dans un porte-échantillon.



L'objectif assigné à ce jour à OSIRIS est d'assurer la réalisation de ces irradiations technologiques conformément aux exigences des clients, d'anticiper les demandes d'expérimentations destinées à terme, à être réalisées sur le futur réacteur Jules Horowitz (RJH), et d'assurer la continuité des programmes jusqu'au démarrage opérationnel de celui-ci.

L'intérêt d'OSIRIS pour les matériaux est le flux important de neutrons rapides et thermiques à l'intérieur et en périphérie du cœur du réacteur, qui est supérieur à celui rencontré en centrale nucléaire. OSIRIS permet ainsi l'étude du vieillissement des matériaux et l'anticipation des mesures à prendre. Parmi les expériences concernant le combustible, certaines portent sur le comportement sous irradiation des composants du combustible : la matière fissile, la gaine, les gaz de fission... D'autres reproduisent des phases d'exploitation des centrales nucléaires, mettant à l'épreuve les crayons combustibles.

Le cœur du réacteur OSIRIS peut accueillir jusqu'à 16 dispositifs expérimentaux dans des emplacements où le flux neutronique rapide (supérieur à 1 MeV) est de 1 à $2 \cdot 10^{18}$ n/m²s. Des structures placées à l'extérieur du cœur permettent d'accueillir simultanément 27 dispositifs en première périphérie où le flux neutronique rapide maximum est 10 fois plus faible qu'en cœur et de nombreux autres en seconde et troisième périphéries.

Le service d'instrumentation d'OSIRIS conçoit, réalise et exploite les dispositifs d'irradiations technologiques, et assure les études nucléaires associées aux irradiations (expertise en calculs neutroniques, thermiques, et thermohydrauliques, spectrométrie gamma, neutronographie, dosimétrie et mesures nucléaires).



Porte-échantillon pour éprouvettes de ténacité.



COMMENT EFFECTUER DES EXAMENS SUR MATÉRIAUX IRRADIÉS AU LECI

QUI CONTACTER

Service d'Études des Matériaux Irradiés (SEMI)

Commissariat à l'Énergie Atomique - Saclay
Direction de l'Énergie Nucléaire
Direction déléguée aux Activités Nucléaires de Saclay
Point courrier 101
91191 Gif-sur-Yvette - Cedex - France

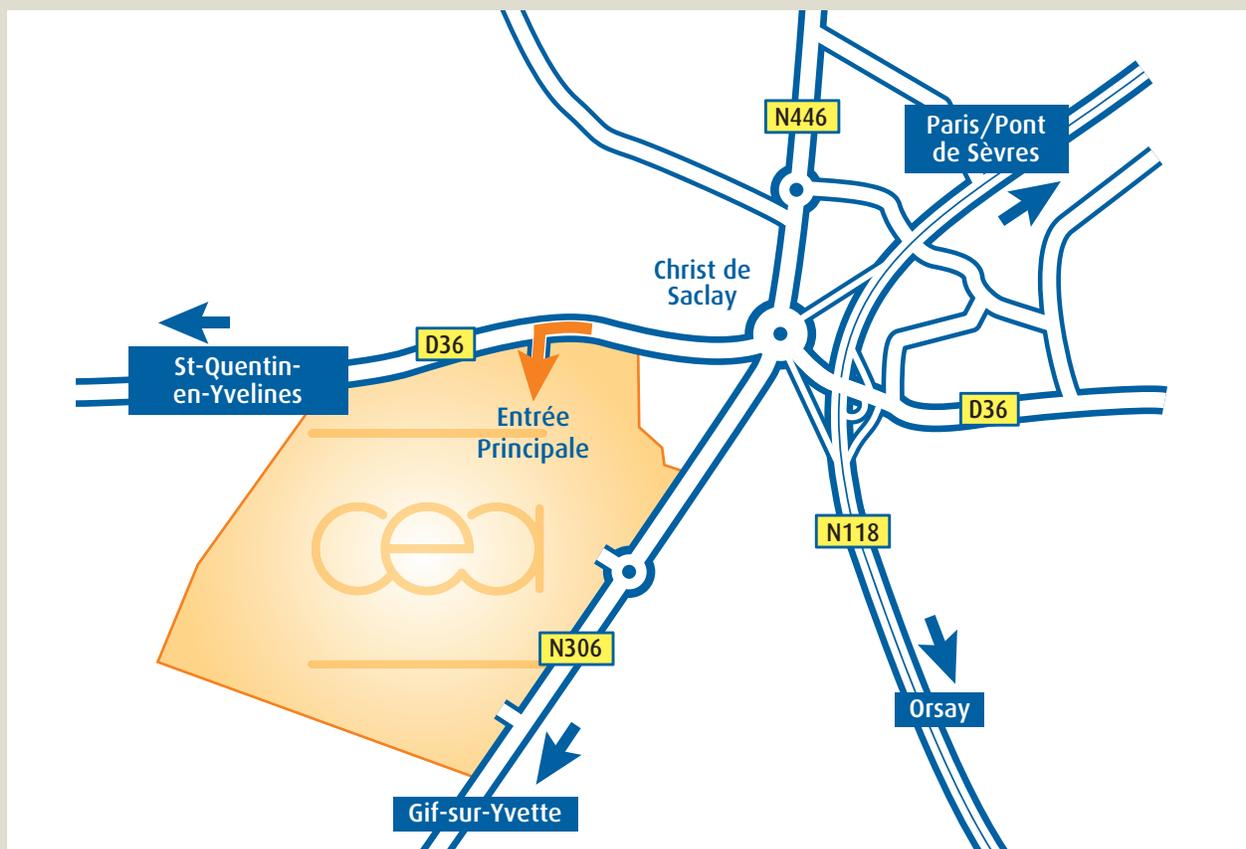
Téléphone : 01 69 08 41 17
Télécopie : 01 69 08 26 81

*La Direction de l'Énergie
Nucléaire est certifiée ISO 9001
pour les activités de R&D.
De plus, le LECI est dans
le périmètre de certification ISO
14001 du centre CEA de Saclay.*



Certificat AFAQ

COMMENT VENIR À SACLAY ?



À partir du Pont de Sèvres

Sud-ouest de Paris (environ 40 minutes).

Sur le périphérique extérieur prendre la sortie direction **Bordeaux / Nantes**.

Prendre la route N118 direction Chartres / Orléans et la sortie Saclay / Gif-sur-Yvette.

Cette sortie mène au rond-point du Christ de Saclay. De là, prendre la D36 direction Châteaufort.

Le centre CEA de Saclay est à moins d'un kilomètre sur la gauche.

À partir de la Porte d'Orléans

Sud de Paris (environ 40 minutes).

Sur le périphérique Sud de Paris, prendre l'autoroute **A6** à la Porte d'Orléans et suivre les directions suivantes :

Orléans / Lyon, Chartres / Orléans par l'autoroute, Versailles / Igny-Bièvres - Cité scientifique, puis Saclay.

Au rond-point du Christ de Saclay, prendre la D36 direction Châteaufort.

Le centre CEA de Saclay est à moins d'un kilomètre sur la gauche.



COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE - Saclay
Direction de l'Énergie Nucléaire
Direction déléguée aux Activités Nucléaires de Saclay
91191 Gif-sur-Yvette - Cedex - France
Point courrier 101
Téléphone : 01 69 08 41 17 - Télécopie : 01 69 08 26 81