

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY

Service de Documentation

F91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

CEA-CONF -- 8495

R1

CONSEQUENCES DE L'AUGMENTATION DU TAUX DE COMBUSTION

SUR LE COMBUSTIBLE

MELIN, P.	FRAGEMA, 69-Lyon (France)
LAVOINE, O.	Electricite de France, 69-Lyon (France)
HOUDAILLE, B.	CEA CEN Saclay, 91-Gif-sur-Yvette (France). IRDI, DMECN

Communication présentée à : SFEN Technical meeting
Cadarache (France)
11 Apr 1986

**CONSEQUENCES DE L'AUGMENTATION DU TAUX DE COMBUSTION
SUR LE COMBUSTIBLE**

**P. MELIN
(FRAGEMA, LYON, FRANCE)**

**D. LAVDINE
(EDF, LYON, FRANCE)**

**B. HOUDAILLE
(CEA, SACLAY, FRANCE)**

1 - INTRODUCTION

L'importance du parc nucléaire français a conduit à optimiser les conditions de fonctionnement des tranches. En particulier la stratégie de gestion du combustible fait partie de cet effort.

Un point important de cette stratégie est l'augmentation du taux de combustion de décharge qui implique un surenrichissement initial du combustible.

Actuellement le combustible FRAGEMA standard est conçu pour un épuisement final de l'ordre de 30 GWj/tU (moyen assemblage) à la puissance nominale de fonctionnement.

L'augmentation du taux de combustion de décharge conduit à des valeurs de l'ordre de 50 GWj/tU (moyen assemblage) dans un futur proche et même accrues à l'avenir.

Ces conditions plus sévères d'irradiation, associées au fonctionnement en suivi de réseau, risquent de faire apparaître des phénomènes physiques limitatifs pour la tenue du combustible.

De façon à les déterminer et à pallier leur éventuelle nocivité, un programme de recherche et développement haut taux de combustion a été initié par les partenaires FRAGEMA, CEA et EDF.

Les actions ainsi définies revêtent deux aspects :

- Statistique qui consiste en l'acquisition sur site d'un grand nombre de données physiques sur des assemblages irradiés en réacteur jusqu'à des épuisements élevés.
- Analytique lors d'expérimentations réalisées en réacteurs d'essais.

L'ensemble de ces programmes permet d'identifier les phénomènes qui pourraient limiter les performances du combustible et d'orienter la recherche d'améliorations.

2 - LES PERFORMANCES EN REACTEUR DU COMBUSTIBLE FGA

Actuellement, au cours d'actions liées à la surveillance du combustible standard en gestion normale ou d'actions plus spécifiques d'études à haut taux de combustion, environ 65 assemblages FGA ont fait l'objet d'examen dimensionnels sur site (1). Les taux de combustion moyens assemblage concernés couvraient un large domaine allant de 10 à 55 GWj/tU. Par ailleurs, environ 30 crayons ont été extraits sur site et ont été (ou seront) examinés en cellule chaude, leurs taux de combustion allant de 20 à 55 GWj/tU.

L'ensemble des résultats qui ont pu être ainsi acquis montrent globalement un bon comportement du combustible FGA jusqu'à des taux de combustion moyens assemblage de 55 GWj/tU.

Ces résultats concernent en particulier les phénomènes suivants :

- Les modifications géométriques du squelette et particulièrement son grandissement,
- le grandissement des crayons,
- l'arcure des crayons,
- l'oxydation externe du gainage des crayons,
- le relâchement des gaz de fission,
- l'allongement de la colonne fissile,
- la variation diamétrale du gainage.

2.1 MODIFICATIONS GEOMETRIQUES DU SQUELETTE

Sous irradiation, le squelette d'un assemblage se modifie sous l'influence du flux et de ses gradients.

On observe plusieurs types de modifications : la torsion, la flèche, l'inclinaison et le grandissement. Toutes les mesures qui ont pu être faites sur les trois premiers phénomènes, jusqu'à 55 Gwj/tU, n'ont pas montré d'anomalie de comportement.

Les mesures de grandissement effectuées ont montré, comme prévu, pour des taux de combustion allant jusqu'à 40 GWj/tU, un allongement à peu près linéaire et compatible avec l'espacement entre plaques de coeur.

En revanche pour des taux de combustion plus élevés, on a relevé une accélération du phénomène qui, aux alentours de 55 GWj/tU, pourrait éventuellement entraîner l'interférence assemblages/plaques de coeur.

2.2 GRANDISSEMENT DES CRAYONS

L'allongement des crayons doit rester compatible avec les jeux embouts/crayons ménagés en fabrication.

L'ensemble des mesures effectuées sur du combustible 17 X 17 jusqu'à 55 GWj/tU montre qu'il n'y a pas d'accélération du grandissement et que celui-ci reste compatible avec les jeux initiaux (Figure 1).

En revanche, on a pu observer des dispersions de comportement dont l'origine reste à identifier précisément mais qui pourrait être reliée à la dispersion des propriétés métallurgiques du matériau.

2.3 ARCURE DES CRAYONS

L'arcure des crayons, en modifiant les passages d'eau influence le régime thermohydraulique et réduit localement les marges en DNB. Un effort important a été fait pour quantifier l'arcure des crayons et tenter d'en comprendre l'origine.

L'ensemble des données recueillies dans les réacteurs français a permis tant à EDF qu'à FRAGEMA, de construire une courbe limite d'arcure moins conservatrice que la courbe NRC (Figure 2).

Par ailleurs, une étude paramétrique aux bornes des spécifications n'a pu mettre en évidence une influence des caractéristiques géométriques de la gaine (ovalité, épaisseur) et des pastilles (chanfrein, hauteur) sur le phénomène d'arcure.

2.4 OXYDATION EXTERNE DES GAINES

Les examens visuels et les prélèvements de dépôts effectués sur site montrent d'une façon générale que les dépôts de produits de corrosion sur les gaines sont très faibles (2).

Les mesures d'oxyde réalisées ne montrent pas de comportement anormal du Zircaloy vis-à-vis de la corrosion. La valeur locale maximale mesurée est de 65 μm pour un taux de combustion de 55 GWj/tU. Ces résultats correspondent cependant à des valeurs de puissance faibles en fin de vie (Figure 4). Par ailleurs, on observe de fortes dispersions dans les mesures dont l'origine peut être cherchée dans la variabilité des conditions locales de fonctionnement, en particulier.

2.5 RELACHEMENT DES GAZ DE FISSION

Les quantités de gaz de fission relâchées ont été mesurées sur tous les crayons examinés en cellule chaude. On a pu noter un accroissement des quantités relâchées avec l'épuisement et particulièrement entre la fin des cycles 4 et 5. Néanmoins, les valeurs mesurées restent faibles, de l'ordre du 1 % à 55 Gwj/tU (Figure 3).

Rappelons que ces données ont été obtenues pour des valeurs de puissance faible en fin de vie et sans suivi de réseau.

2.6 ALLONGEMENT DE LA COLONNE FISSIONNABLE

L'allongement de la colonne fissile est dû au gonflement de l'oxyde.

Dans un premier temps, on assiste à une densification de l'oxyde, puis à un gonflement entraînant un allongement de la colonne quasi linéaire en fonction de la fluence.

Ce gonflement de la colonne participe à la réduction du volume libre qui atteint environ 40 % de la valeur initiale à 55 Gwj/tU (Figure 5).

2.7 VARIATION DIAMETRALE DU GAINAGE

Des mesures obtenues à partir de profilométrie (Figure 6) montrent que le fluage du gainage, qui participe à la diminution des volumes libres dans le crayon, a bien lieu jusqu'à 20 à 25 Gwj/tU. On n'observe pas de modification significative du gainage jusqu'à 50 Gwj/tU.

3 - LES PROBLEMES POTENTIELS LIES A L'AUGMENTATION DU TAUX DE COMBUSTION

L'augmentation du taux de combustion peut contribuer à amplifier les phénomènes précédemment décrits pour les raisons suivantes :

- * Augmentation du temps de séjour en réacteur.
- * Augmentation de la fluence.
- * Accroissement du nombre de transitoires.

Ces paramètres gouvernent, pour l'essentiel, les comportements que nous avons mis en évidence.

3.1 MODIFICATIONS GEOMETRIQUES

L'augmentation de la fluence entraîne un grandissement plus important des assemblages et des crayons. Au vu des résultats obtenus sur du combustible standard enrichi à 3,1 % jusqu'à 56 Gwj/tU, il ne semble pas se poser de problèmes pour les crayons. De même, l'arcure ne doit pas être un obstacle à l'augmentation du taux de combustion. En revanche, l'allongement des assemblages est un des paramètres qui nécessite une analyse plus détaillée ; toutefois, il est aisé d'en tenir compte et d'adapter si nécessaire le dimensionnement axial de l'assemblage.

3.2 PRESSION DES GAZ DE FISSION

L'augmentation du taux de combustion au-delà de 50 Gwj/tU semble avoir tendance à augmenter le relâchement des gaz de fission comme nous l'avons vu précédemment. Les valeurs que nous avons indiquées restent faibles néanmoins, pour un fonctionnement au-delà de 55 Gwj/tU et particulièrement en suivi de réseau, ces valeurs risquent de devenir plus importantes et ce phénomène mérite une attention particulière.

En outre, l'allongement de la colonne fissile, qui contribue à une diminution du volume libre, et l'augmentation de la quantité de gaz de fission relâchés entraînent une augmentation de la pression interne.

3.3 OXYDATION EXTERNE DES GAINES

Les deux principaux facteurs de corrosion sont le temps et la température de gaine, elle-même fonction du flux thermique.

En conséquence, l'augmentation du temps de séjour en réacteur ne peut conduire qu'à augmenter la corrosion de la gaine.

3.4 FATIGUE DES GAINES

L'accroissement du nombre de cyclages peut entraîner une réduction de la marge d'endommagement des gaines par un cumul de fatigue et de fluage.

4 - LES ACTIONS DE R ET D

4.1 EN REACTEUR DE PUISSANCE

Afin d'étudier les phénomènes mentionnés précédemment et de minimiser leurs conséquences, un certain nombre d'actions, tant sur site qu'en cellule chaude, ont été lancées. Ces actions qui regroupent les partenaires français CEA, EDF et FGA sont :

- Le prolongement pour un quatrième, puis un cinquième cycle d'irradiation d'assemblages FRAGEMA standard enrichis à 3,1 %. Ces assemblages ont subi des examens visuels et dimensionnels ; 4 crayons ont été extraits à la fin de chaque cycle pour être examinés en cellule chaude.
- L'irradiation de 4 assemblages enrichis à 4,5 % durant quatre cycles à des niveaux de puissance en fin de vie représentatifs de ceux vus par du combustible standard. Ces assemblages doivent atteindre un taux de combustion de 45 GWj/tU. Les premiers résultats obtenus après deux cycles sont cohérents avec ceux obtenus sur du combustible standard. Outre les examens visuels et dimensionnels en fin de chaque cycle d'irradiation, il est prévu d'effectuer des mesures d'oxyde et des prélèvements de dépôts.
- Le démantèlement d'un assemblage standard irradié durant 5 cycles, de façon à étudier chaque élément du squelette de l'assemblage : tubes-guides, vis, embouts, grilles.

4.2 EXPERIENCES ANALYTIQUES

En complément à ce retour d'expérience en réacteur de puissance, un autre volet du programme de recherche et développement consiste en des expérimentations plus analytiques visant à obtenir une meilleure compréhension des phénomènes (comportement des crayons en transitoire, comportement de l'oxyde, corrosion externe du gainage). De plus, des irradiations en réacteurs expérimentaux (BR3, CAP) permettent d'obtenir des informations similaires à celles acquises dans les réacteurs de puissance, mais dans des conditions de fonctionnement plus sévères (niveaux de puissances plus élevés, épuisements plus importants), et sur différents types de conception.

4.2.1 COMPORTEMENT DU COMBUSTIBLE EN TRANSITOIRE

L'accroissement des épuisements de décharge mène à un accroissement du nombre de transitoires subis par le combustible et, du fait de l'utilisation d'enrichissements plus élevés, à des transitoires plus sévères.

C'est pourquoi un effort important est consacré aux programmes visant à analyser les conséquences des transitoires sur le comportement du combustible. Dans ce domaine, plusieurs types d'expérimentations sont réalisés :

- des essais de fatigue (3) dont le but est, sur tubes de gainage non irradiés et irradiés, d'acquérir des données expérimentales permettant de vérifier la validité des modèles utilisés.
- des programmes visant à déterminer les puissances et les variations de puissance maximales admissibles, sans entraîner de ruptures de gaine par interaction pastille-gaine.

Ces programmes, nationaux ou internationaux, consistent à faire subir à des crayons préalablement irradiés à différentes valeurs de combustion massique, des sauts de puissance jusqu'à rupture.

Les programmes internationaux OVER-RAMP et SUPER-RAMP maintenant achevés, portaient sur des crayons de différentes conceptions irradiés à des combustions massiques comprises entre 15 et 45 GWj/tU. L'analyse et l'exploitation des résultats de ce programme permettent de déterminer des limites de rupture qui sont utilisées en particulier pour l'étude du comportement du combustible en suivi de réseau.

Des programmes de même nature sont engagés en France sur le combustible FRAGEMA. Ils portent sur des crayons irradiés entre 35 et 55 GWj/tU dans Fessenheim 2 et sur des crayons irradiés dans la CAP. Il s'agit de voir d'une part, l'effet d'un fort taux de combustion, d'autre part l'effet de cyclage du combustible sur les limites de rupture.

- En ce qui concerne les transitoires incidentels de deuxième catégorie, le programme TRIBULATION a pour but de montrer la capacité du combustible de différentes conceptions -en particulier celle de FRAGEMA- à résister, à fort taux de combustion à des transitoires sévères de courte durée. Ce programme doit permettre de fournir des données nécessaires aux études sur le comportement du crayon en situation de deuxième catégorie.
- De plus, les irradiations en cours dans le réacteur CAP permettent d'effectuer une démonstration globale de l'aptitude du combustible à subir des transitoires programmés tout au long de sa vie. Dans cette optique, 4 assemblages standard FRAGEMA ont été chargés dans ce réacteur, ils diffèrent des assemblages des réacteurs de puissance par leur longueur active (1,80 m au lieu de 3,66 m) et un enrichissement plus élevé (4,95 % au lieu de 3,25 %) (4).

Soumis à une simulation de transitoires représentatifs du suivi de réseau, ils ont subi au cours de 2 campagnes d'irradiation 694 cycles de suivi de charge dont la moitié environ était combinée à des variations de puissance simulant le télé réglage (Tableaux 1A, 1B).

À la fin de chaque campagne, des tests ont montré l'étanchéité de ces assemblages. Ainsi, aucune rupture n'est apparue sur les 1300 crayons dont l'épuisement maximal dépassait 33 GWj/tU.

De plus, à l'issue de chaque campagne, des crayons ont été extraits ; leur examen en cellule chaude n'a pas mis en évidence de différences particulières et significatives par rapport à des crayons irradiés en base (Tableau 2).

La poursuite de l'irradiation de deux de ces assemblages pour une troisième campagne a débuté en 1985 et conduira à un épuisement moyen des assemblages de 45 GWj/tU soit, localement dans les crayons, plus de 55 GWj/tU. Des examens post-irradiation sur les assemblages et les crayons permettront de tirer les enseignements de cette expérimentation.

4.2.2. CORROSION EXTERNE DU GAINAGE

L'étude analytique de la corrosion externe des gaines est réalisée en particulier dans le cadre du programme international NFIR. Les essais, qui sont réalisés dans la boucle CIRENE à CADARACHE, doivent permettre d'appréhender les mécanismes de corrosion sur des gaines de différentes fabrications. De plus, des essais hors pile sont effectués par l'AECL pour trouver un test de corrosion représentatif. Enfin, un programme d'irradiation dans le réacteur de GOESGEN (Suisse) doit permettre d'évaluer d'une façon plus globale les phénomènes de corrosion dans un environnement thermohydraulique particulièrement sévère.

Afin de ne pas accroître l'oxydation du gainage par la présence de dépôt, des études analytiques en boucles d'essais hors pile et en pile ont été menées pour optimiser la chimie du primaire (5).

Un essai longue durée a également été réalisé au cours duquel des appoints au réfrigérant primaire ont été simulés pour rendre compte des mouvements d'eau plus importants rencontrés au cours du fonctionnement en suivi de charge.

4.2.3 IRRADIATIONS EXPERIMENTALES BR3

Depuis plusieurs années, le CEA et FRAGEM ont entrepris l'irradiation de plus de 800 crayons, dans le réacteur expérimental BR3, dans le but d'étudier les performances de différentes conceptions de crayon jusqu'à des épuisements élevés. Ces irradiations ont commencé au coeur 3D et se poursuivent dans les coeurs suivants (4B, 4C, 4D).

A chaque opération de déchargement, certains de ces crayons sont extraits pour examens. Les objectifs de ces irradiations sont d'étudier l'influence d'un grand nombre de paramètres de conception sur le comportement du combustible jusqu'à des épuisements élevés (> 70 GWj/tU localement). Les principaux paramètres analysés actuellement sont :

- pour les pastilles : la microstructure (DCN/DCI, procédé de fabrication, taille de grain), la géométrie, la densité ;
- pour les gaines : l'état métallurgique (détendu, recristallisé, trempé), la géométrie.

Les résultats obtenus, par les examens post-irradiation déjà effectués à des épuisements locaux supérieurs à 50 GWj/tU pour des puissances de l'ordre de 200 W/cm, viennent compléter les informations obtenues en réacteur de puissance. De plus, la variété des paramètres étudiés permet d'obtenir des résultats pouvant contribuer à la recherche de solutions visant à accroître les épuisements de décharge comme la microstructure des pastilles, la pression interne, l'état métallurgique du gainage.

4.2.4 COMPORTEMENT DES PASTILLES

Le comportement des pastilles est étudié au travers de programmes analytiques sur les phénomènes de gonflement et de relâchement des produits de fission (6) :

- le programme international NFIR, actuellement en cours, étudie le gonflement de différents types d'oxydes
- le programme international HBEP fournit des données sur le relâchement des gaz de fission de combustibles de fabrications variées pour des gammes de puissances de 150 à 450 W/cm et des épuisements supérieurs à 70 Gwj/tU
- le programme CEA-FDF-FGA permet l'étude de la cinétique de relâchement des gaz de fission à des épuisements élevés en conditions stables et transitoires. Pour ce faire, 2 crayons préirradiés pendant 3 et 4 campagnes dans FESSENHEIM 2 sont réirradiés dans le réacteur SILOE à GRENOBLE, où est mesuré, en continu, le relâchement des gaz de fission pour différents niveaux de puissance.

4.3 BILAN

Au travers de ces programmes de R et D, le concepteur dispose :

- d'une base de données afin d'étayer les modèles qui servent à prédire le comportement du crayon de combustible jusqu'à de forts épaissements ;
- d'éléments qui permettent d'identifier les phénomènes qui peuvent limiter les performances du produit ;
- au travers des expérimentations paramétriques, des résultats qui permettent d'orienter la recherche de solutions afin d'accroître les performances.

5 - AXES PRIVILEGIÉS D'ÉVOLUTION

Les observations réalisées dans les réacteurs de puissance et dans les expériences analytiques, contribuent à dégager les directions privilégiées de recherche. Quatre directions privilégiées se dégagent dès lors, qui couvrent :

- les modifications géométriques sous-irradiation
- la pression interne
- le comportement de la gaine en transitoire
- la résistance de la gaine à la corrosion externe.

Les recherches d'innovations conduisent

- à mieux comprendre les phénomènes et paramètres de fabrication qui régissent le comportement du produit ;
- à apporter des modifications éventuelles dans la fabrication du produit ;
- à élaborer de nouveaux produits.

5.1 MODIFICATIONS GÉOMÉTRIQUES DU GAINAGE SOUS IRRADIATION

La réduction de la dispersion des caractéristiques métallurgiques et mécaniques du produit est une voie qui contribue à améliorer l'aptitude du crayon combustible à atteindre des épaissements élevés avec un taux de fiabilité accru.

Deux actions concrétisent ce souci :

- la mise en place industrielle dès 1986 d'un traitement thermique final des tubes de gainage sous atmosphère neutre permettant de diminuer notablement les écarts de température entre les tubes d'une même charge. La dispersion des caractéristiques mécaniques du produit s'en trouvent réduites et le comportement est alors plus reproductible.

- la réduction à moyen terme du grandissement axial des crayons et du risque d'interférence avec les embouts de l'assemblage:
 - . en identifiant, dans la gamme de fabrication, les causes de grandissements excessifs observés. Les investigations en cours permettent de mettre en évidence le rôle joué par la composition chimique, et de se prémunir de ce phénomène en réduisant la variabilité des teneurs en certains éléments ;
 - . en favorisant éventuellement l'utilisation d'états métallurgiques du Zircaloy 4 qui réduisent la croissance sous irradiation ;
 - . en aménageant les cotes axiales du crayon et de l'assemblage.

5.2 PRESSION INTERNE

Comme il a été montré, la quantité de gaz de fission à l'état libre dans le crayon s'accroît avec l'épuisement, contribuant à l'augmentation de la pression interne.

Compte tenu des observations réalisées et des niveaux élevés d'épuisements envisagés, la pression interne pourrait avoisiner les limites de conception. Afin de dégager les marges nécessaires, les solutions suivantes sont envisagées :

- réduction du niveau initial de pressurisation initiale. Cette voie a déjà été retenue pour les assemblages à 4,5 % . De plus, des crayons expérimentaux ont également été irradiés dans le BR3 avec des pressions initiales de 15 bars,
- accroissement des volumes libres à l'intérieur du crayon (chambre d'expansion, ressort de taille réduite),
- ajustement de la microstructure des pastilles favorisant la rétention des gaz de fission.

5.3 COMPORTEMENT DE LA GAINÉ EN TRANSITOIRE

Dans ce domaine, on distingue plusieurs directions de recherche visant à identifier les paramètres de fabrication ayant une influence sur la susceptibilité du gainage à la fissuration sous contrainte telles que :

- l'étude du rôle de l'état de surface interne dans l'initiation des fissures,
- la recherche d'un état de précipitation plus favorable,

- la réduction des précipités initiateurs de fissures par l'utilisation de nouveaux alliages,
- la confirmation du rôle de la texture dans le processus de propagation, en étudiant plus particulièrement le comportement des matériaux irradiés.

5.4 RESISTANCE DE LA GAINÉ A LA CORROSION EXTERNE

La recherche de solutions nouvelles visant à améliorer la tenue du gainage vis-à-vis de la corrosion externe est orientée autour d'axes tels que :

- améliorer l'état de surface externe du gainage qui est un facteur permettant de contrôler les étapes d'initiation et de développement de la couche d'oxyde ;
- optimiser l'état métallurgique ;
- rechercher une nouvelle nuance d'alliage.

6 - CONCLUSION

Les succès obtenus sur le combustible **FRACEMA** des réacteurs exploités par EDF démontrent son bon comportement en service. Les résultats des programmes de recherche et de développement poursuivis conjointement par EDF, FEA et le CEA montrent l'aptitude de ce combustible à être irradié à fort épaulement et permettent de mettre en évidence les axes de recherche afin d'accroître encore les performances du produit dans un environnement de plus en plus sollicitant (accroissement des puissances et des épaulements couplés au suivi de réseau).

Dans les solutions envisagées, on a pu distinguer les ajustements de fabrication et de conception (géométrie, prescription initiale), des modifications plus fondamentales du produit (gainage, pastille) qui nécessitent la poursuite de programmes de Recherche et de Développement.

Dans cette optique, **FRACEMA**, en collaboration avec ses partenaires CEA, FENEC, Zircotebe, a mis sur pied un projet qui réunit les moyens de conception, de fabrication et d'expérimentation qui rendent possible l'étude d'innovations qui vont depuis une évolution sensible du produit actuel jusqu'à des modifications plus fondamentales. EDF participe à cette démarche de façon à faire connaître les contraintes liées à l'exploitation du futur produit. La prise en compte de ces contraintes oriente les axes principaux du développement.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) "Examens sur site et en cellule des assemblages combustibles français".
P. BORDES et AL. - SFEN - 2-6 Septembre 1985.

- (2) "In reactor corrosion data on Fragema fuel".
J. THOMAZET et AL. - AIEA Cadarache - 14-18 Octobre 1985.

- (3) "Cumulative fatigue and creep-fatigue damage at 350° C on recrystallized Zircaloy 4".
G. BRUN et AL. - ASTM Strasbourg - 24-27 Juin 1985.

- (4) "Irradiation in the CAP Reactor of FRAGEMA Fuel Assemblies under Power Transients Representative of Superimposed Load Follow and Remote Control Regimes".
A. PUIL et AL. - AIEA Petten - Septembre 1982.

- (5) "In reactor corrosion and crud deposition data on FRAGEMA fuel".
J. THOMAZET et AL. - Orlando Floride - 21-24 Avril 1985.

- (6) "Experience on fission gas release in high burnup fuel rods operating in power plants".
D. BARON et AL. - IAEA Karlsruhe - 11-15 novembre 1985.

TABLEAU 1A - CONDITIONS D'IRRADIATION DANS LE REACTEUR

- P_f = puissance maximale à la fin du transitoire (kw/m)
- ΔP = variation maximale de puissance (kw/m)

BU (Gwd/t)	Suivi de charge		Télé réglage	
	P_f	ΔP	P_f	ΔP
11	38	27	30	12
22	32	27	27	10
33	25	22	24	7

TABLEAU 1B - CYCLAGES DANS LE CAP

	1	2
Nombre de cycles d'irradiation		
Nombre de cycles de suivi de charge	304	390
Nombre de transitoires de télé réglage	136	192

TABLEAU 2 - RESULTATS D'EXAMENS DE CRAYONS

Cycle	Nombre de crayons	BU (Gwd/t)	Fraction relachée (%)	$\frac{\Delta l}{l}$ (%)	$\frac{\Delta \rho}{\rho}$ (%)
1	6	14-17	0,07-0,09	0,2-0,3	0,15-0,6
2	15	30-35	0,2-1,1*	0,4	0,5-0,7

* NOTE : mesure effectuée sur un crayon irradié à puissance locale entre 250 W/cm et 300 W/cm avec un épaissement local de 43 Gwd/tU en fin d'irradiation.

FIGURE 1
ALLONGEMENT DES CRAYONS

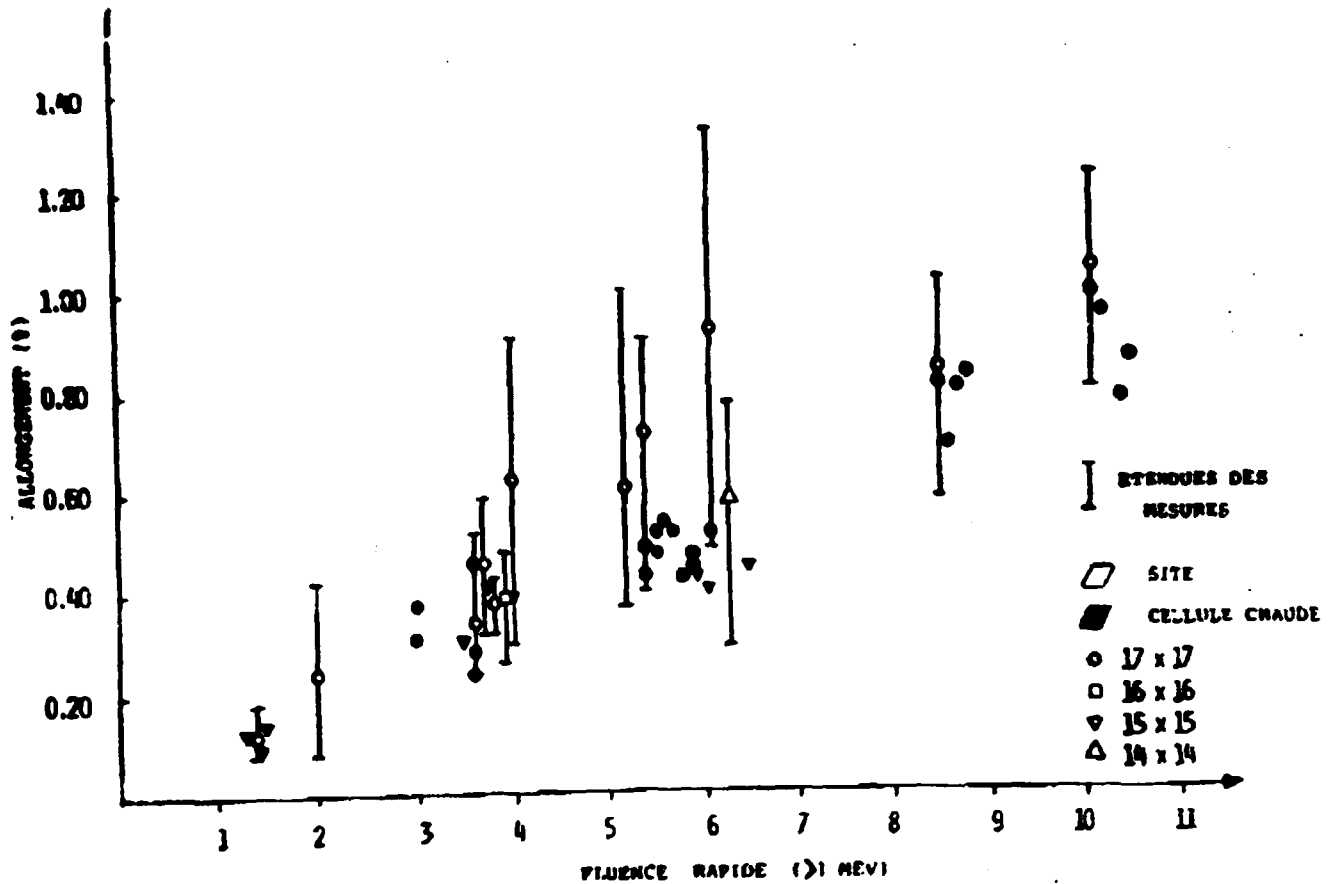


FIGURE 2

**TAUX DE FERMETURE QUI N'EST DÉPASSÉ
QUE PAR 5 % DES ESPACEMENTS
AU NIVEAU LE PLUS DÉFAVORABLE
(COMBUSTIBLE 17 x 17)**

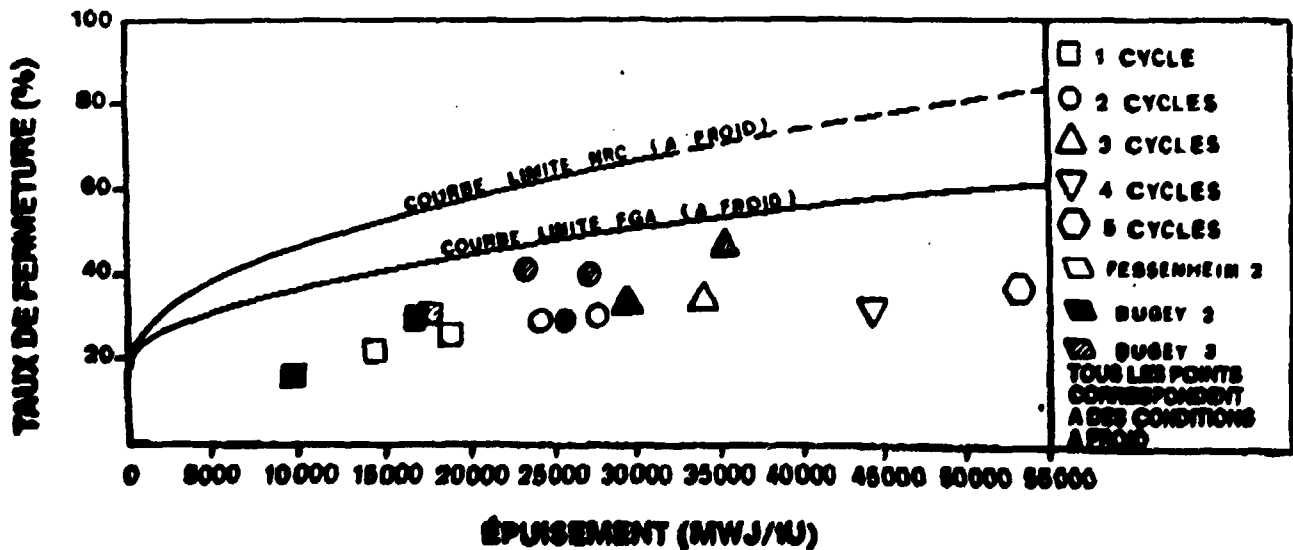


FIGURE 3
FRACTION DE GAZ RELACHÉE

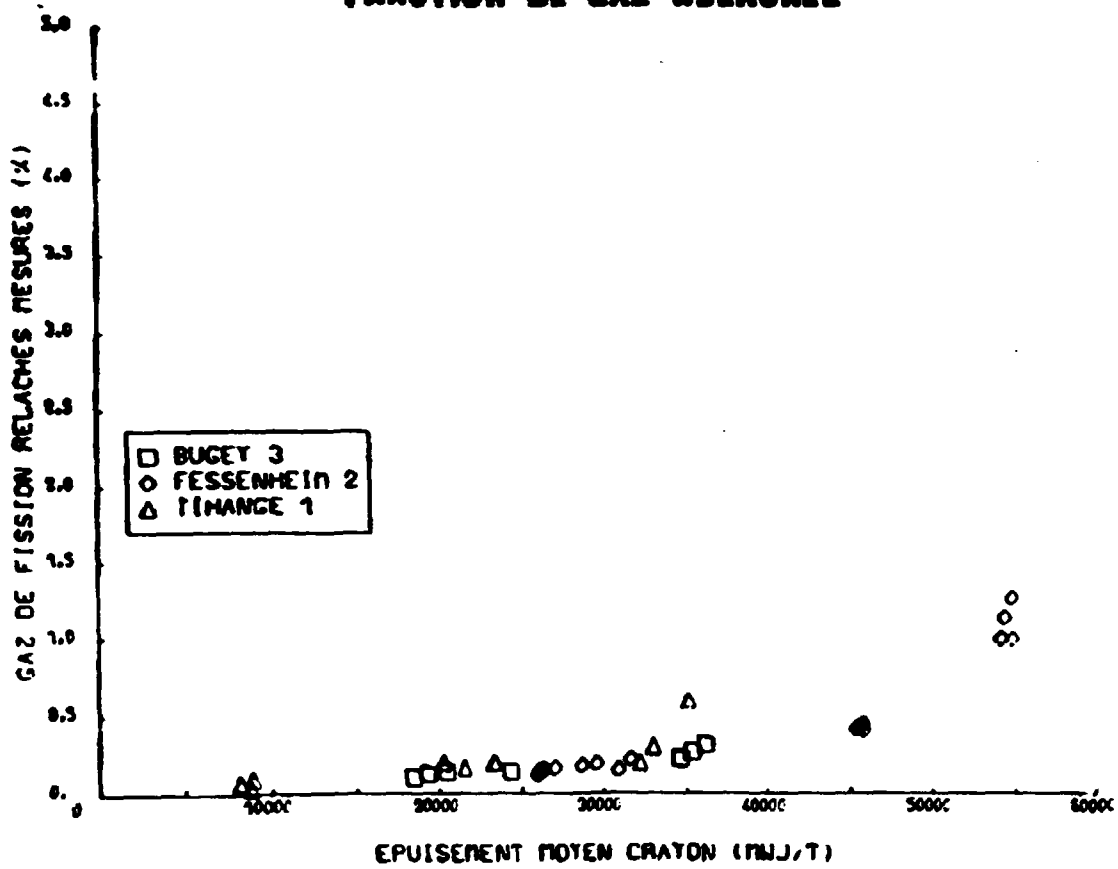


FIGURE 4
CORROSION EXTERNE DU GAINAGE
AU NIVEAU LE PLUS DEFAVORABLE

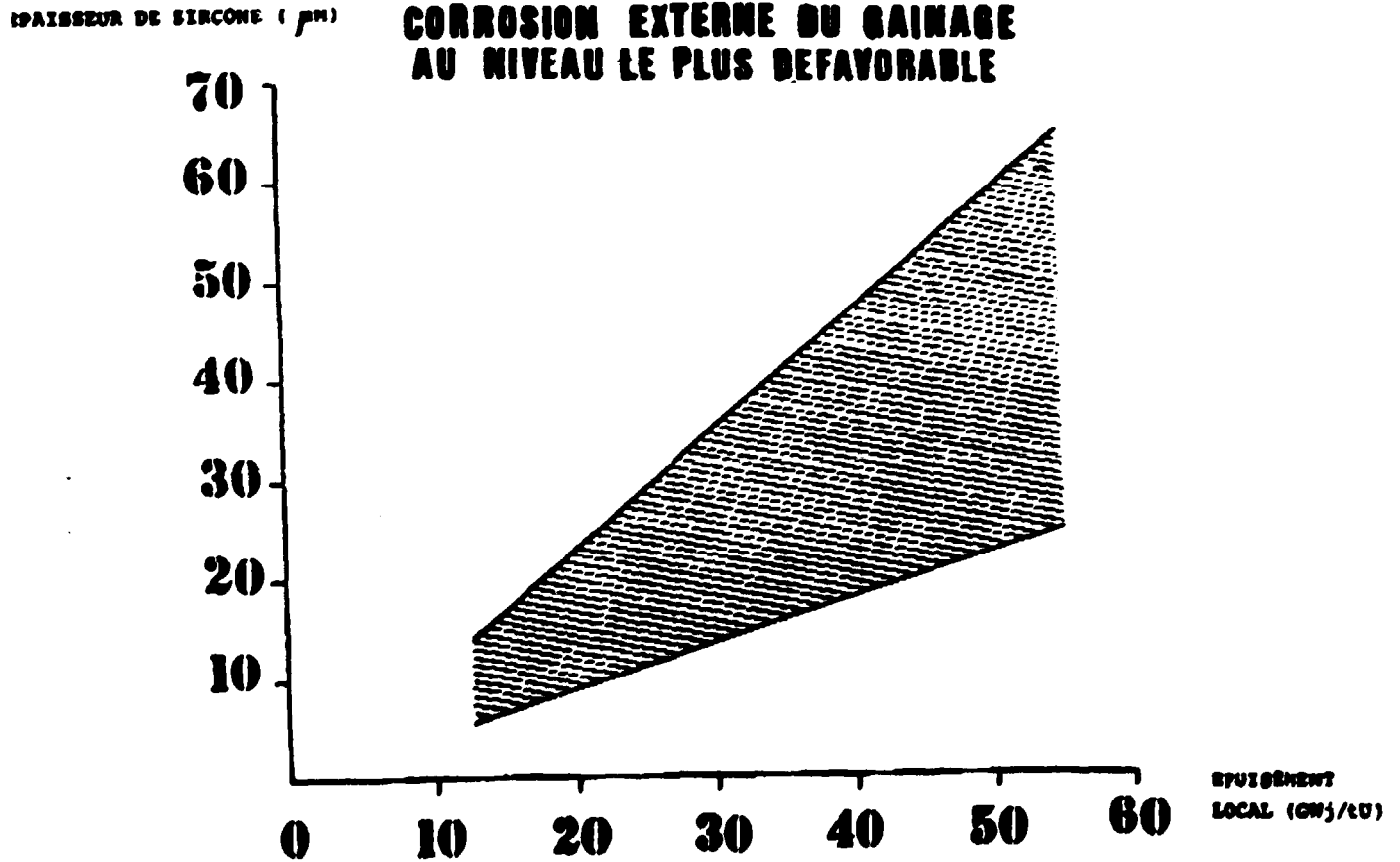


FIGURE 5
VOLUME LIBRE

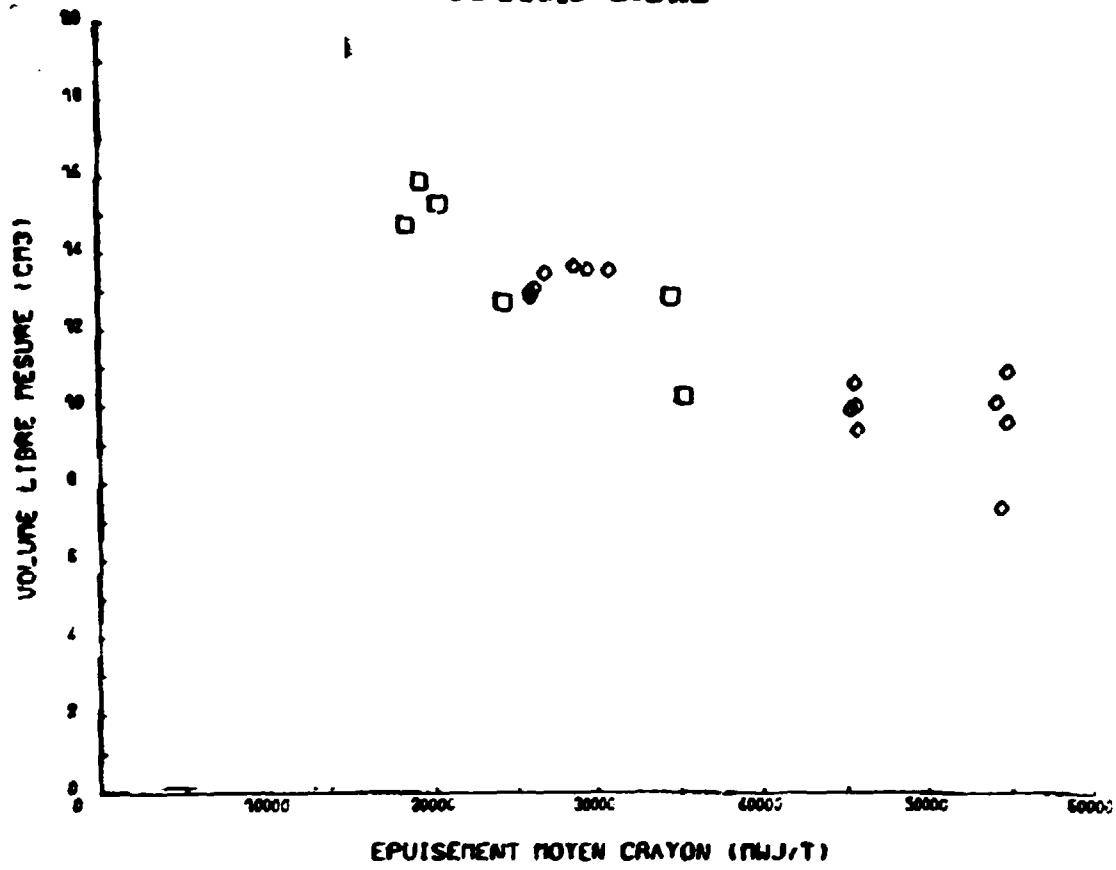


FIGURE 6
FLUAGE DE LA GAINÉ

