

FR 480168

Conférence Internationale sur le Comportement des
matériaux métalliques et des composants des coeurs
des réacteurs rapides.

Ajaccio, France, 5 au 7 Juin 1979

CEA - CONF 4652

DEFORMATION PLASTIQUE DES GAINES DES ELEMENTS COMBUSTIBLES
FORTISSIMO.

MARBACH G. - MILLET P. - BLANCHARD P.

C.E.A.

CADARACHE

FRANCE

10/5

RESUME.

L'étude d'un grand nombre d'aiguilles standards Fortissimo gainées en acier
316 hypertrempé montre que la déformation plastique dépend linéairement de la pression
des gaz de fission et de la dose (en dpaF). Le module de fluage d'irradiation que l'on
en déduit est compris entre 1 et $2 \cdot 10^{-6}$ (MPa dpaF)⁻¹ à 450°C et augmente régulièrement
avec la température.

1 - INTRODUCTION

Les gaines des éléments combustibles de la filière à neutrons rapides subissent sous irradiation une augmentation de diamètre due à deux effets.

- une dilatation volumique (gonflement) associé à la présence de cavités dans le métal et supposée isotrope. Nous avons pu vérifier cette hypothèse sur des aiguilles vides où l'allongement mesuré est conforme à l'intégrale du gonflement :

$$\int \Delta\phi / \phi \, dl = \Delta l \text{ mesuré}$$

- une déformation sous l'effet de forces extérieures généralement appelée "déformation plastique".

Il n'existe pas de mesure directe de la déformation plastique et on ne peut qu'essayer de l'approcher en effectuant la différence entre la déformation totale et le gonflement.

$$\Delta\phi / \phi \text{ déformation plastique} = \Delta\phi / \phi \text{ total} - 1/3 \Delta V/V$$

L'étude de la déformation plastique soulève une double question :

- Quel est le moteur de la sollicitation (interaction mécanique oxyde-gaine ?, pression des gaz de fission, ?...)
- Quel est le mécanisme de la déformation ? (fluage thermique, fluage d'irradiation, déformation plastique instantanée?).

Cette seconde question revêt une importance particulière, car si l'on admet généralement un caractère superplastique au fluage d'irradiation, le fluage thermique ou la déformation plastique instantanée peuvent entraîner une détérioration importante de la gaine pour de faibles déformations.

Nous n'avons pas jusqu'à présent pu apporter une réponse fiable à ces deux questions, car nous ne disposons pas d'un nombre suffisant de mesures de profils de déformation plastique sur une population homogène de gaines.

Nous avons choisi des gaines ayant subi des conditions d'irradiation diverses en température, dose et position dans le réacteur (tableau 1) et appartenant à deux lots qui ont pour le moment la réputation d'avoir le meilleur (lot I) et le moins bon (lot II) comportement sous irradiation du point de vue de la déformation diamétrale totale.

Pour compléter notre analyse nous disposons également de quelques profils de déformation plastique sur des aiguilles expérimentales :

- gaines de type standard ayant subi un dégonflage en cours de vie,
- gaine de géométrie Phénix ou Super-Phénix à faible pression interne,

2.- ETUDE QUALITATIVE

La simple comparaison visuelle de divers profils de déformation plastique met en évidence l'influence de trois paramètres : température, pression interne des gaz de fission et dose (en dpa).

- Dans un même assemblage les aiguilles se déforment d'autant plus qu'elles sont proches du centre de l'assemblage et donc irradiées à une température plus élevée (ex. assemblage 59 - figure 1).

- A profil de dose et de température équivalents, la déformation plastique est d'autant plus faible que la pression interne est moins élevée, ainsi des aiguilles de géométrie Super Phénix irradiées dans Fortissimo se déforment nettement moins que les aiguilles standards Fortissimo.

Aiguille	Température maxi. °C	Dose maximum dpa	Contrainte de pression en fin de vie (M Pa)	ep max.
Y 2 n° 15	597	73	16	0,45
59 n° 17	600	76	117	3,95

Pour la même nuance de gaine on observe également qu'une aiguille dégonflée en cours d'irradiation présente une déformation plastique plus faible qu'une aiguille laissée intacte.

Lorsque le vase d'expansion est nettement déformé (cas de l'aiguille 22 du 59 par exemple - figure 1), la déformation plastique diminue régulièrement avec la dose. Or, à ce niveau, seules existent les contraintes de pression et la température est constante. La déformation plastique est donc nettement activée par l'irradiation.

On n'observe qualitativement aucune variation sensible de la déformation plastique avec les différents lots d'oxydes, ou les jeux différents oxyde-gaine.

On remarque, par contre, une certaine corrélation entre la déformation plastique et le gonflement : lorsque deux aiguilles voisines ont des profils globaux très différents, cette différence est sensible sur la déformation plastique et sur le gonflement.

3 - CALCUL DU MODULE DE FLUAGE D'IRRADIATION

Les observations qualitatives suggèrent un mécanisme de fluage d'irradiation sous l'effet de la pression des gaz de fission, mais sous une forme peu commune puisque activée thermiquement.

Nous avons alors regardé si les points expérimentaux satisfont à une relation du type fluage d'irradiation.

$$\epsilon = A \bar{\sigma} \phi t$$

ϵ : déformation plastique,
 $\bar{\sigma}$: contrainte moyenne de pression des gaz de fission (on néglige l'effet des contraintes secondaires dues, par exemple, au gradient de gonflement),
 ϕt : dose finale intégrée (en dpa),
 A : module de fluage, $\bar{\sigma} = \frac{3}{4} \frac{P D}{e}$
 P : 1/2 pression théorique des gaz de fission en fin de vie,
 D : diamètre moyen de la gaine,
 e : épaisseur de la gaine.

Le facteur $3/4$ provient du fait que la contrainte équivalente (ou Mises) dans ce système est égal aux $3/4$ de la contrainte tangentielle. Cette formulation suppose que le dégagement des gaz est total et instantané. Nous discuterons cette hypothèse plus loin.

Les valeurs du module de fluage A sont reportées en fonction de la température sur les figures 2 à 4. (La température utilisée est la température moyenne calculée au cours de la vie).

Dans chaque cas, nous obtenons un usage relativement homogène avec un module de fluage qui augmente régulièrement avec la température : la valeur du module de fluage est quinze fois plus élevée à 600°C par rapport à 450°C.

Nous discuterons dans le paragraphe suivant, les influences des différents paramètres (nuance d'acier, dose température, etc...), mais on peut remarquer de suite que la valeur du module de fluage calculé à 450°C, voisine de $1,5 \cdot 10^{-12} \text{Pa}^{-1} \text{dpaF}^{-1}$ est très proche des valeurs calculées d'après les expériences de fluage d'irradiation sur les tubes pressurisés [1].

Cette constatation est en faveur de notre hypothèse d'une déformation plastique proportionnelle à la dose et à la contrainte appliquée.

4 - DISCUSSION DES DIFFERENTS PARAMETRES**4.1. - Effet de la nuance d'acier**

On observe une dispersion légèrement plus importante des valeurs de module de fluage calculées pour le lot II, mais en moyenne le comportement du point de vue de la déformation plastique est similaire. La différence de comportement du point de vue de la déformation diamétrale totale ne provient donc que du gonflement. Il faut dire que celui-ci diffère d'un facteur 2 pour certaines aiguilles.

Compte tenu de la dispersion expérimentale ; la loi de déformation en réacteur est similaire pour les différents aciers 316 hypotremés. L'influence de la nuance d'acier ou des caractéristiques de l'hypotrempe est nettement plus faible sur le fluage observé en réacteur que sur le gonflement.

4.2. - Effet de la dose et comparaison avec les expériences de fluage d'irradiation

Nous avons supposé que la déformation plastique des gaines suivait une relation analogue au fluage d'irradiation des tubes pressurisés, c'est-à-dire en première approximation linéaire avec la dose reçue (en dpaF).

L'éventail des doses, relativement faible, ne permet pas de vérifier de façon formelle cette dépendance, compte tenu de la dispersion des résultats expérimentaux. Cependant, la cohérence des valeurs de modules de fluage calculées pour toutes les aiguilles semble indiquer que cette dépendance linéaire est une approximation correcte.

Nous avons reporté sur la figure 4 les valeurs de module de fluage d'irradiation calculées à partir des irradiations de tubes pressurisés dans Rapsodie et Phénix [1]. Dans le domaine de température de ces irradiations (400-500°C), on observe un bon accord avec les modules calculés sur les aiguilles. Il n'existe malheureusement pas d'expérience de fluage d'irradiation sur de l'acier 316 hypotremé à plus haute température.

L'accélération du module de fluage en réacteur n'est pas confirmée par des expériences spécifiques quoique cette évolution soit déjà perceptible.

Cette activation thermique du fluage en réacteur pourrait être reliée à une évolution de la structure métallurgique de la gaine (précipitation de carbures par exemple comme le suggère HOFFMANN and al [2]) évolution qui serait responsable par ailleurs du gonflement à haute température (ou de 2ème bosse).

4.3. - Le problème de l'estimation des températures

Une partie de la dispersion des points expérimentaux (fig. 2 à 4) pourrait provenir d'une connaissance insuffisante des températures d'irradiation. Nous avons choisi arbitrairement de reporter les valeurs de module de fluage en réacteur en fonction de la température moyenne calculée au cours de la vie, deux types d'erreur en résultent :

- la température est calculée dans l'assemblage sans tenir compte de l'évolution de la géométrie du faisceau d'aiguille au cours du temps et donc d'une diminution de la surface des canaux de passage de sodium,
- en cas de changement de position, il est difficile d'attribuer une température expérimentale. Comme la pression des gaz de fission augmente linéairement avec le temps, la température de la dernière partie de l'irradiation devrait avoir un poids plus important.

Mais si l'on suppose que la cinétique de fluage est associée à une évolution de la structure métallurgique activée thermiquement, une température activée en début de vie peut avoir une influence sur toute la vie.

Faute d'éléments de comparaison corrects, nous n'avons pas pu mettre en évidence de façon certaine l'influence du cycle d'irradiation.

h.4. - Effet de la pression

La pression gazeuse origine de la contrainte.

La pression gazeuse apparaît comme la sollicitation dominante responsable de la déformation plastique des gaines : les observations suivantes suffiraient à le prouver :

- la déformation plastique est systématiquement plus faible sur des aiguilles à grand vase d'expansion et faible pression interne,
- à basse température le module de fluage en réacteur calculé à partir des déformations des gaines est cohérent avec les valeurs déduites des irradiations de tubes pressurisés,
- la déformation plastique d'aiguilles ayant subi un dégonflage en cours d'irradiation est plus faible que celle des aiguilles intactes,
- dans notre représentation et quelle que soit la géométrie de la gaine ou les conditions de l'irradiation, le nuage des points expérimentaux est relativement serré.

S'il est vraisemblable que la déformation est proportionnelle à la contrainte à basse température comme sur les irradiations de tubes pressurisés, cette dépendance est peut être différente à plus haute température. Il est cependant certain que l'exposant de la contrainte n'est pas aussi important que pour les relations de fluage thermique.

La pression gazeuse au niveau de la colonne fissile.

Les contraintes de pression ne sont pas connues avec précision au cours du temps. On connaît certes la quantité de gaz dégagée comprise entre 85 % et 100 % des gaz formés pour la plupart des aiguilles Fortissimo, mais on ne connaît pas l'évolution exacte de la pression au cours du temps. L'écoulement des gaz n'est vraisemblablement pas instantané le long de l'aiguille et des rétentions locales peuvent exister et entraîner un surcroît de déformation. Ce qui expliquerait certaines irrégularités des profils de déformation plastique spécialement au niveau haut de colonne fissile.

h.5. - Existence d'une corrélation entre fluage en réacteur et gonflement

Pour voir si la dispersion de nos résultats expérimentaux pourrait s'expliquer en partie par une corrélation fluage-gonflement, nous avons reporté sur la figure 5 les valeurs du module de fluage calculé en fonction du gonflement mesuré à une température donnée (525°C)

On observe que les valeurs du module de fluage sont d'autant plus élevées que le gonflement est important et la dépendance entre ces deux variables est presque linéaire.

Cette corrélation observée peut provenir de causes extérieures (mauvaises connaissances des températures, évolution structurale du matériau, etc...) qui auraient une influence identique sur la déformation plastique et le gonflement sans qu'il existe une liaison dans le mécanisme de base de ces deux phénomènes.

Cependant, certains auteurs voient une relation plus étroite entre gonflement et fluage d'irradiation [3] et proposent une relation du type :

$$\dot{\epsilon} = (A\phi + B\sigma)$$

$\dot{\epsilon}$: vitesse de fluage d'irradiation

ϕ : dose instantanée

σ : vitesse de gonflement

Pour tenir compte éventuellement de cette corrélation, nous étudierons une loi de ce type dans le paragraphe suivant et nous verrons qu'elle donne d'excellents résultats.

5 - AJUSTEMENTS DE LOIS EMPIRIQUES DE DEFORMATION PLASTIQUE

La discussion des différents paramètres que nous avons faite dans le paragraphe 4, montre que la déformation plastique des gaines s'explique correctement par une vitesse de fluage proportionnelle à la contrainte des gaz de fission et à la dose. Il convient alors de proposer des lois de déformation qui permettent de rendre compte de la réalité expérimentale. Etant donné le nombre insuffisant d'expériences scientifiques de fluage d'irradiation sur de l'acier 316 hypereffort et l'absence de mesures au dessus de 500°C, la seule solution consiste à ajuster une loi sur les mesures expérimentales des aiguilles.

Nous proposons deux lois ajustées sur les résultats expérimentaux des aiguilles irradiées en assemblage du lot I (qui constituent une population relativement homogène).

- l'une propose une légère corrélation entre fluage et gonflement :

$$\dot{\epsilon} = A\sigma\phi \exp(-Q/RT) + B\sigma$$

σ gonflement

ϵ déformation plastique en %

σ contrainte tangentielle moyenne en MPa

$$A : 3,62 \cdot 10^5$$

$$Q : 34100 \text{ cal}$$

$$B : 1,47 \cdot 10^{-3}$$

Variance sur les 217 points du lot I $S^2 = 0,12$
 sur tous les points expérimentaux $S^2 = 0,15$
 - l'autre est une simple loi d'activation thermique
 $\epsilon = A \sigma \exp(-Q/RT)$
 $A : 1,05 \cdot 10^4$ $Q : 27.600 \text{ cal}$
 Variance sur les 217 points du lot I $S^2 = 0,21$
 sur tous les points expérimentaux $S^2 = 0,24$

Nous observons que sur les deux lois l'écart moyen entre valeur calculée et valeur mesurée est en moyenne inférieure à 0,3 %, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur de l'erreur expérimentale de mesure compte tenu de la précision sur la mesure du diamètre d'une part et des incertitudes sur le choix d'une masse volumique de référence pour la mesure du gonflement d'autre part.

L'ajustement que nous avons fait est en faveur d'une corrélation entre fluage et gonflement, mais il ne permet pas de dire évidemment si cette liaison a lieu au niveau du mécanisme de base ou en raison de paramètres extérieurs qui ont la même influence sur le fluage et le gonflement (température, état métallurgique, etc...).

CONCLUSION

La déformation plastique des gaines en acier hypertrempé suit, en première approximation, une loi de type fluage d'irradiation :

$$\epsilon = A \sigma_{\text{pression}} \exp(-Q/RT)$$

Le facteur A, ou module de fluage, augmente avec la température et sa valeur est multipliée par un facteur 15 entre 450°C et 600°C.

Nous avons proposé des lois ajustées sur les résultats expérimentaux d'un lot Fortissimo qui permettent d'approcher la réalité expérimentale de façon correcte pour les autres nuances de gaines et les autres géométries.

Les hypothèses que nous avons faites sur l'origine de la sollicitation dominante (pression des gaz de fission) sont vérifiées par la bonne cohérence de nos résultats.

Une meilleure connaissance de l'influence de la dose et de la contrainte à des températures voisines de 600°C serait cependant utile et ne peut être obtenue que par des irradiations expérimentales qui sont actuellement en préparation.

REFERENCES

- [1] DUPOUY J.M. - LEHMANN J. - CARTIER L. - HUILLERY R. - MILLET P.
 International conference : Radiation effects in breeder - Reactor structural materials
 (Edited by bleiberg ML and BENETT J.W. A.I.M.E. 1977)
- [2] HOFMANN G.L. - TRUFFERT J. - DUPOUY J.M.
 J. Nucl. Mat 65 (1977) 200
- [3] HEALD - HARBOTTLE J.E.
 J. Nucl. Mat 67 (1977) 229

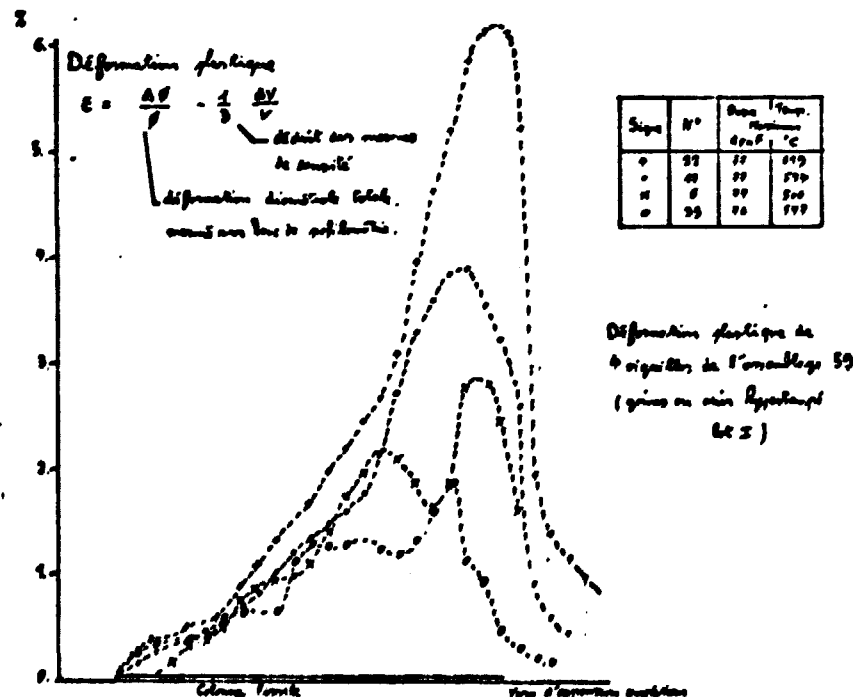
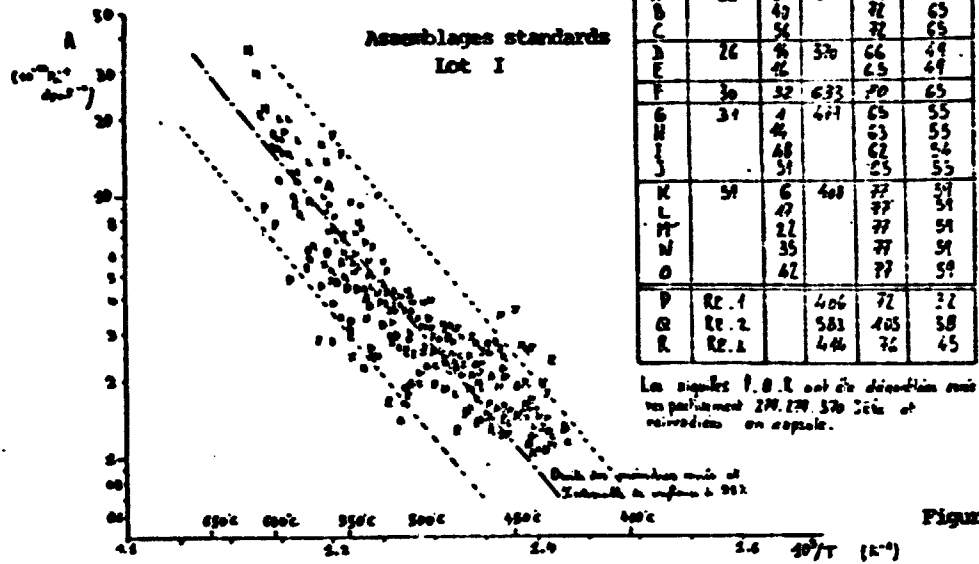


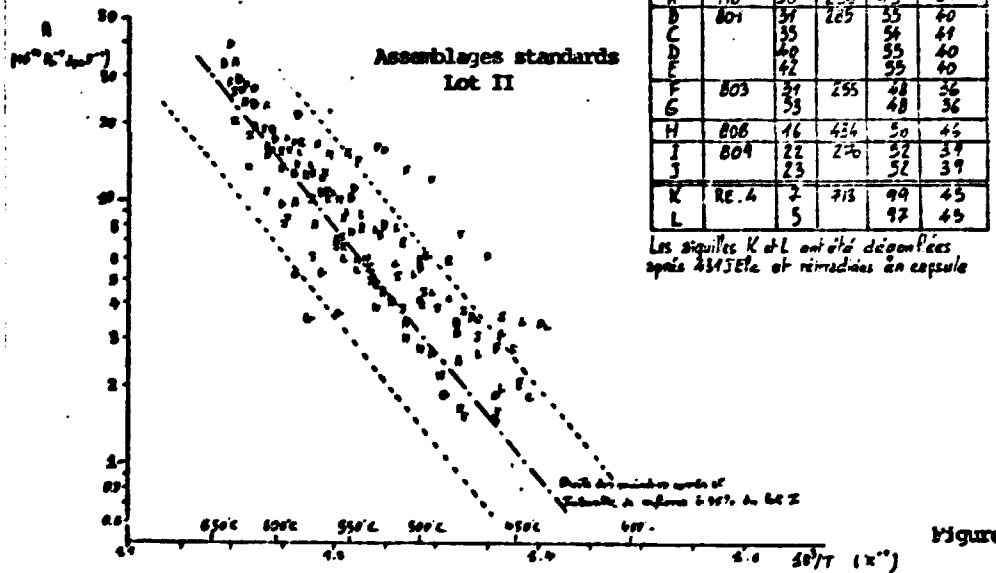
Figure 1.

DEF. PLAST. GAINES E.C. FORTISSIMO



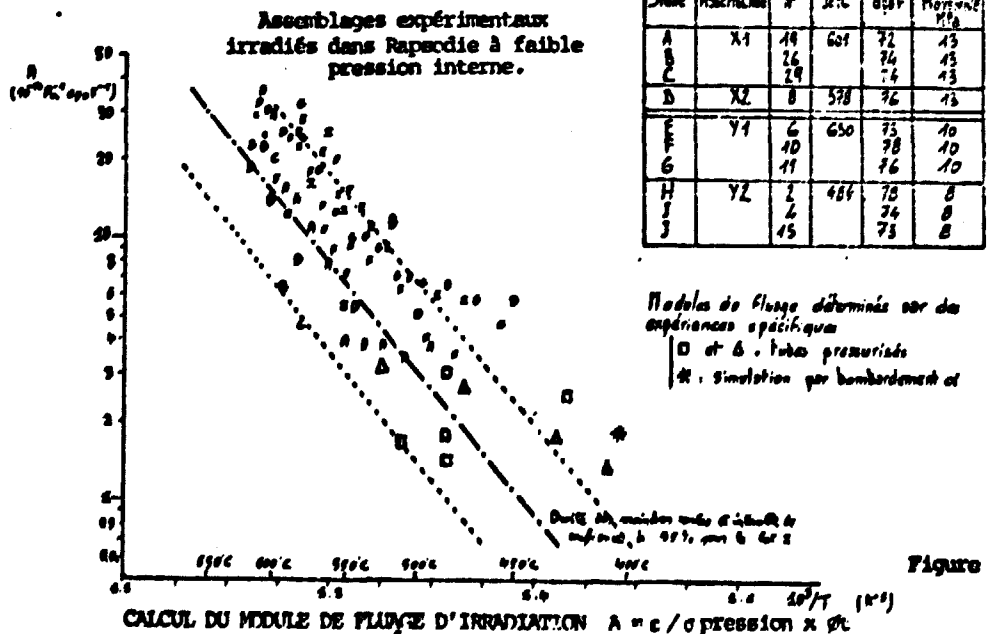
CALCUL DU MODULE DE FLUÛGE D'IRRADIATION

$A = c / \sigma \text{ pression} \times \sigma T$



CALCUL DU MODULE DE FLUÛGE D'IRRADIATION

$A = c / \sigma \text{ pression} \times \sigma T$



CALCUL DU MODULE DE FLUÛGE D'IRRADIATION

$A = c / \sigma \text{ pression} \times \sigma T$