

FR 4901763

INIS

**LE COMPORTEMENT D'ACIERS FERRITIQUES SOUS IRRADIATION
AUX NEUTRONS RAPIDES**

par Jean ERLER
Arlette MAILLARD
Gilbert BRUN
Jeane LEHMANN
Jean-Michel DUPOUY

Agents CEA - CEN. SACLAY

Conference Internationale sur le Comportement des
matériaux métalliques et des composants des coeurs
des réacteurs rapides.
Ajaccio, France, 5 au 7 Juin 1979
CEA - CONF 4647

LE COMPORTEMENT D'ACIERS FERRITIQUES SOUS IRRADIATION
AUX NEUTRONS RAPIDES

ESLER J. - MAILLARD A. - BRUN G. - LEMARIE J. - DUPONT J.M.

C.E.A. SACLAY FRANCE

RESUME

Des aciers ferritiques ont été irradiés dans Rapsodie et dans Phénix, à des doses variables allant jusqu'à 150 dpa. On rapporte ci-dessous les caractéristiques de gonflement et de fluage d'irradiation ainsi que les caractéristiques mécaniques de ces matériaux.

1 - INTRODUCTION

Les aciers ferritiques sont envisagés comme matériaux pour les tubes hexagonaux des assemblages des réacteurs à neutrons rapides. Il était nécessaire de connaître leur gonflement à doses élevées, leurs caractéristiques mécaniques après irradiation et surtout d'avoir des données sur le fluage d'irradiation de ces aciers dans un domaine de contraintes correspondant à celui existant dans la partie la plus sollicitée du tube hexagonal.

2 - CONDITIONS EXPERIMENTALES

2.1. - Gonflement et caractéristiques mécaniques

Un premier groupe d'expériences a été effectué dans Rapsodie à des doses élevées obtenues par réirradiations successives des échantillons. Certains ont atteint 148 dpa et sont actuellement sur la voie des 200 dpa. Les températures variaient de 400 à 600° C.

D'autres expériences ont été faites dans Phénix à des doses ne dépassant pas 40 dpa. Les températures étaient basses, environ 400° C. Les échantillons étaient, en général, des éprouvettes de traction utilisées pour les mesures de densité puis pour les essais mécaniques.

Deux groupes d'acier ont été irradiés, les premiers sont des aciers à 17 % de chrome qui sont, soit d'origine industrielle, soit issus de fabrication de laboratoire avec une teneur en carbone très basse et des additions de niobium ou de titane. Les seconds appartiennent au groupe des aciers à 12 % de chrome, l'un ferrito-martensitique est voisin de l'EM 12, l'autre est martensitique. Les analyses sont portées dans le tableau 1.

2.2. - Fluage d'irradiation

Une expérience a été réalisée dans Phénix (P2), dans le but de comparer le fluage d'irradiation d'un acier ferritique à 17 % de chrome à celui d'aciers 316. Les résultats concernant ces derniers sont relatés par ailleurs à cette conférence [1].

La dose maximale atteinte a été 51,4 dpa. Les températures calculées à chacun de huit étages vont de 400 à 550° C. Les contraintes sont voisines de 100 MPa dans sept des tubes ; dans cinq autres, les mesures de pression après irradiation montrent une diminution de la contrainte jusqu'à des valeurs allant de 79 à 61 MPa. Enfin huit échantillons étaient sans contrainte au départ.

3 - RESULTATS

3.1. Gonflement

Toutes les mesures de densité effectuées sur ces aciers montrent des gonflements pratiquement nuls pour toutes les compositions et pour des doses allant jusqu'à 148 dpa (fig. 1).

Seules deux nuances irradiées dans Phénix ont montré un $\Delta\rho/\rho_0$ de 0,1 à 0,25 % dès 5 dpa, correspondant à 1 350 heures sous flux.

Ceci constitue un cas particulier pour lequel la microscopie électronique a permis de mettre en évidence la présence de phase σ contenant une très forte quantité de cavités (fig. 2). Cette phase σ préexistait dans le matériau et il est probable qu'elle ait été très rapidement saturée en cavités. AZAM N., LE NAOUR L., DELAPLACE J. [2] avaient montré que la phase σ produite dans un acier 316, lors d'un traitement de carburation, contenait également, après irradiation aux ions, une forte densité de cavités.

	C	Cr	Mn	Si	Mo	Ti	Nb	V	Etat métallurgique
Aciers à 17 % de chrome	0,007	17,3	0,37	0,28	2,79	0,004	0,21	0,03	1) recuit 1 100 °C - 10 mn 2) recuit 1 100 °C + ε 15 % 3) recuit 1 100 °C + ε 30 %
	0,005	16,9		0,32	2,73	0,05	< 0,03	< 0,03	1) recuit 1 100 °C - 10 mn 2) recuit 1 100 °C + ε 15 % 3) recuit 1 100 °C + ε 30 %
	0,028	17,7	0,32	< 0,28	3,03	0,07	< 0,03	< 0,03	1) recuit 1 100 °C - 10 mn 2) recuit 1 100 °C + ε 15 % 3) recuit 1 100 °C + ε 30 %
	0,028	17,2	0,35	0,31	2,31	0,005	0,21	0,03	1) recuit 1 100 °C - 10 mn 2) recuit 1 100 °C + ε 15 % 3) recuit 1 100 °C + ε 30 %
	0,077	16,5		0,27	< 0,01		0,03		1) recristallisé 800 °C-15mn 2) recristallisé 800°C ε20%
	0,041	18,4	0,46	0,32					1) recristallisé 800°C-15mn
	0,085	17,3	0,47	0,35	< 0,1				1) recristallisé 300°C-15mn
	0,062	16,5		0,38	< 0,12	0,01	< 0,03	0,03	1) recristallisé 800°C-15mn 2) recristallisé 800°Cε20%
0,064	17,3	0,23	0,38	0,087	0,47	< 0,03	0,07	1) recuit 1 100 °C	
Aciers à 12 % de chrome	0,097	11,9	0,75	0,3	1,7	< 0,03	0,25		1) trempé 1 050 °C - 15 mn 2) trempé 1 050 °C + 5 h 750 °C 3) trempé 1 050 °C + 5 h 750 °C + ε 30 %
	0,126	10,4	0,61	0,3	0,9	< 0,03	0,36	0,53	1) trempé 1 050 °C - 30 mn

Tableau I - Analyses chimiques des matériaux, état métallurgique

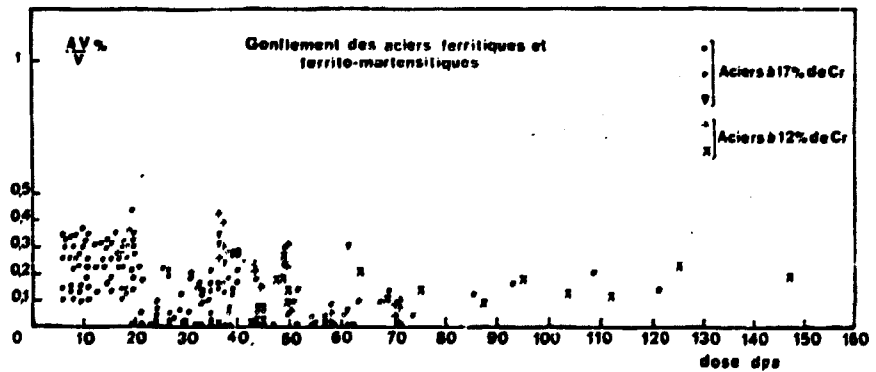


Fig. 1 - Gonfiement des aciers ferritiques de 12 à 17 % de chrome

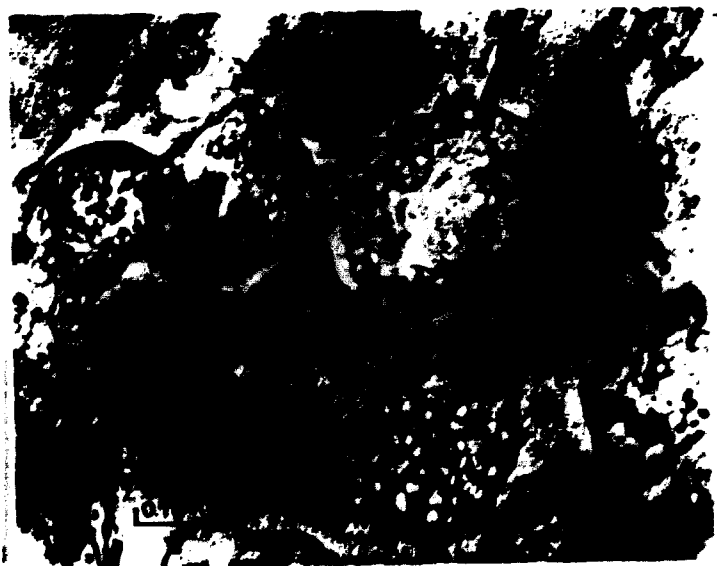


Fig. 2 - Cavités dans la phase sigma d'un acier ferritique à 17 % de chrome irradié à 13 dpa.

L'observation de la matrice par microscopie électronique montre qu'il n'y a que de très rares cavités, confirmant ainsi l'absence de gonflement de ce matériau s'il a subi le traitement thermique adéquat évitant la précipitation de la phase J.

Les résultats anciens avaient montré que l'acier à 2,25 % de chrome ne gonflait pas non plus, sous flux de neutrons. Les travaux de JOHNSTON et coll. [3], par simulation aux ions jusqu'à 140 dpa, avaient montré à la fois un gonflement très faible et la position du pic à une température de 150° C plus basse que celle des aciers austénitiques.

Ainsi, quelle que soit leur teneur en chrome, les aciers ferritiques ne présentent pas de gonflement.

3.2. Caractéristiques mécaniques

A 450° C, les caractéristiques mécaniques des aciers à 17 % de chrome sont modifiées par le traitement thermique et l'irradiation. Cette modification se manifeste par un durcissement et une fragilisation.

Il y a un décalage entre les domaines de température où l'on observe le durcissement produit par le traitement thermique d'une part et par l'irradiation d'autre part. La figure 3 montre que l'irradiation produit un durcissement jusque vers 400-450° C. En particulier à 450° C, le durcissement produit par le traitement thermique seul est plus accentué que celui produit par l'irradiation à la même température. A 500° C, le durcissement produit par l'irradiation est faible et dépend de l'état métallurgique et de la composition initiale. Ainsi on remarque que l'état recuit d'un acier à 17 % de chrome à 0,002 % C, 2,8 Mo et 0,21 Nb atteint un durcissement d'irradiation égal à celui produit par la même irradiation des états métallurgiques écrouis 15 % et écrouis 30 % aux températures d'irradiation de 400-450° C et 500° C.

Toujours à la température d'essai de 450° C, on observe sur les éprouvettes moniteurs et irradiées, une forte diminution des allongements répartis et des allongements à la rupture. Les valeurs les plus faibles sont mesurées sur les éprouvettes irradiées à basse température ($A \approx 1\%$). Cependant, au cours de ces essais effectués à la vitesse de $8 \cdot 10^{-4}$ s⁻¹, on n'observe pas de rupture fragile comme celle produite à la température ambiante sur une éprouvette moniteur en acier à 17 % de chrome sollicitée en flexion à la même vitesse de déformation.

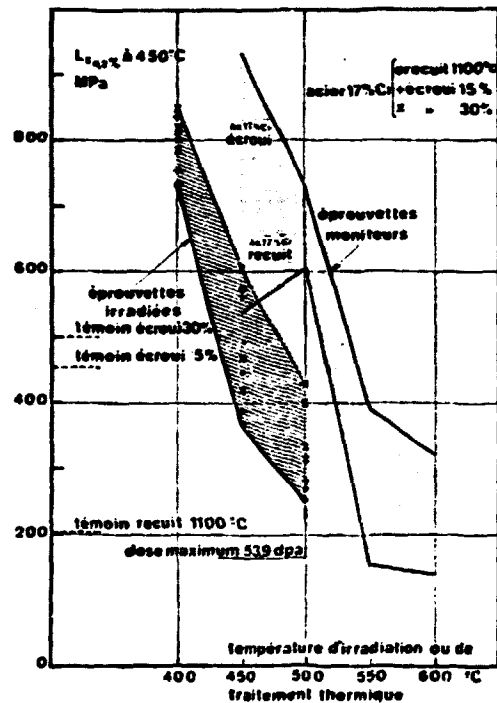


Fig. 3 - Limite élastique à 0,2 % des aciers ferritiques à 17 % de chrome témoins, moniteurs et irradiés dans différents états métallurgiques

3.3. - Fluage d'irradiation

Les mesures des déformations sur les tubes pressurisés sont très faibles pour tous les échantillons situés sur les étages pour lesquels les températures calculées vont de 400 à 500° C. La part du gonflement déterminé par densité est de 0,1 à 0,25 % et la part du fluage d'irradiation va de 0 à 0,05 %, c'est-à-dire qu'elle peut être considérée de l'ordre de la précision des mesures, comme on peut le voir sur le tableau. Seules quelques valeurs sont d'une manière significative supérieures à zéro entre 400 et 500° C.

Aux températures de 525 à 550° C, les échantillons présentent des déformations qui sont vraisemblablement dues au fluage thermique ; la vitesse de fluage est d'environ $0,5 \cdot 10^{-6}$ /h pour une contrainte de 95 MPa à 550° C. Cette vitesse est voisine de celle obtenue hors pile sur ce matériau.

Ainsi le module de fluage d'irradiation de l'acier ferritique à 17 % de chrome est pratiquement nul entre 400 et 500° C. La figure 4 montre la comparaison entre le module de fluage de cet acier et ceux des aciers austénitiques 316 et 316 Ti écrouis.

Ainsi ce matériau présente à la fois un gonflement et un fluage d'irradiation très faibles, ce qui renforce l'idée suivant laquelle les deux phénomènes seraient couplés.

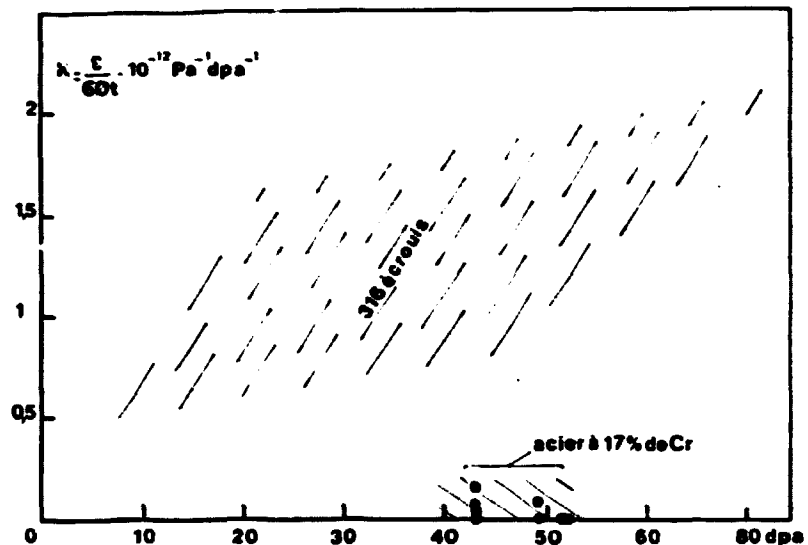


Fig. 4 - Module de fluage d'irradiation de l'acier ferritique à 17 % de chrome (Expérience P2)

4 - CONCLUSION

On a montré l'absence de gonflement des aciers ferritiques de diverses teneurs en chrome pour des doses voisines de 150 dpa. Le bon comportement de ces matériaux est ainsi confirmé pour des doses neutroniques élevées.

On a montré également qu'un acier ferritique à 17 % de chrome ne présentait pas de fluage d'irradiation. Ce résultat apporte un élément nouveau pouvant avoir des conséquences pratiques très intéressantes.

Il va dans le sens de l'hypothèse suivant laquelle il y a corrélation entre fluage d'irradiation et gonflement. Des résultats montrant une tendance analogue ont été obtenus sur des aciers austénitiques [1].

Ceci laisse supposer que l'utilisation d'un acier ferritique comme matériau pour les tubes hexagonaux permettrait d'obtenir un bon comportement en pile.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LEHMANN J., DUPOUY J.M., BROUDEUR R., BOUTARD J.L., MAILLARD A.
Le fluage d'irradiation des aciers 316 et 316 Ti - Communication à cette conférence.
- [2] AZAM N., LE NAOUR L., DELAPLACE J.
Etude par bombardement d'ions des effets d'irradiation dans un acier 316 fortement chargé en carbone - Communication personnelle.
- [3] JOHNSTON W.G., LAURITZEN T., ROZOLOWSKI J.H., TURKALO A.M.
The effect of metallurgical variables on void swelling.
Radiation damage in metals, ASM, Cleveland, 1976, P. 227.

Etage	Temp °C	Dose dpa	N° éch.	σ MPa lin irr.	$\Delta\phi$ Moy μm	ϵ total $\Delta\phi/\phi_0$ %	$\frac{1}{3} \frac{\Delta V}{V_0}$ %	ϵ fluage $\frac{\Delta\phi}{\phi_0} \% - \frac{1}{3} \frac{\Delta V}{V_0} \%$	Vitesse fluage $\dot{\epsilon}$ 10^{-6} h^{-1}	$\frac{\epsilon_H}{\sigma_H \dot{\epsilon} t} 10^{-12} \text{ Pa}^{-1} \text{ dpa}^{-1}$	$K = \frac{\epsilon}{\sigma \dot{\epsilon} t} 10^{-12} \text{ Pa}^{-1} \text{ dpa}^{-1}$	$\frac{\epsilon}{\sigma} 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$	OBSERVATIONS
8	550	24,2	F12 F 8	64 95	17 20	0,260 0,305	0,076 0,020	0,184 0,285	0,32 0,50				Fluage thermique
7	525	33,5	F 7	83	20	0,305	0,033	0,272	0,48				Fluage thermique
6	500	43	F11 F 6	79 61	4 4	0,061 0,061	0,04 0,026	0,021 0,035		0,06 0,13	0,08 0,18	0,35 0,76	
5	475	49,5	F 5	95	4	0,061	0,063	0		0	0	0	
4	450	51,4	F10 F 4	76 93	** **	0 0	0 0	0 0		0 0	0 0	0 0	
3	430	49,2	F 3	103	8	0,122	0,086	0,036		0,07	0,09	0,47	
2	420	43	F 9 F 2	102 101	** 6	0 0,09	0 0,073	0 0,018		0 0,04	0 0,05	0 0,24	
1	407	34,5	F 1	104	10	0,157	0,030						Anomalie

* ϵ/σ (uniaxiales) = $4/3 \cdot \epsilon_H/\sigma_H$ (biaxiales)

** déformation non mesurable

TABLEAU 2 - FLUAGE D'IRRADIATION DE L'ACIER FERRITIQUE A 17 % Cr-
EXPERIENCE P2