

**MESURE DE L'ACTIVITE EN CARBONE DU SODIUM  
AVEC DES FEUILLARDS EN ALLIAGE Fe-Mn 20%  
ET DES ACIERS INOXYDABLES AUSTENITIQUES  
A 304L ET 316L**

C. OBERLIN\*, P. SAINT PAUL\*, P. BAQUE\*\*, L. CHAMPEIX\*\*  
Centre d'études nucléaires de Cadarache,  
Saint-Paul-lez-Durance, France

1 - INTRODUCTION

La connaissance précise de l'activité en carbone du sodium, utilisé comme fluide caloporteur dans les réacteurs surrégénérateurs, est primordiale pour suivre en permanence les phénomènes de carburation-décarburation. Le pouvoir "carburant" ou activité en carbone du sodium, peut être suivi périodiquement, en mesurant la teneur en carbone d'un témoin de carburation ou piège "chaud" tel un feuillard d'un alliage métallique, placé dans le circuit de sodium ; en effet, à l'équilibre, les activités du carbone dans le sodium et dans l'alliage métallique sont égales et si la relation entre la teneur et l'activité en carbone de l'alliage étudié est connue, il est possible d'estimer l'activité du carbone dans le sodium.

Les matériaux utilisés doivent posséder les qualités suivantes :

- Avoir une solubilité en carbone importante aux températures d'utilisation ou conduire à un rapport élevé entre la teneur en carbone dans le matériau et le sodium,
- permettre l'obtention rapide de l'équilibre avec le sodium,
- ne pas contenir d'impuretés qui peuvent fausser les résultats.

\* EDF - Etudes des Matériaux - Renardières

\*\* CEA - STRS/SEML - Cadarache.

Les matériaux choisis, compte tenu de ces critères, ont été le Fe-Mn 20% par l'EDF et les aciers inoxydables austénitiques AISI 304L et 316L par le CEA.

**TABLEAU I - TENEUR EN CARBONE DE DIVERS MATÉRIAUX EN ÉQUILIBRE  
AVEC DU SODIUM ( $a_c = 1$ ).**

Matériau	Température °C	Teneur en carbone pour $a_c = 1$ (ppm)	Référence
Fe $\alpha$	550	11,6	[1]
Fe $\gamma$	750	5900	[1]
Ni	550	235	[2]
	700	617	
	750	800	
Fe-Ni 8%	550	1530	[3]
	700	4150	
	750	5350	
Fe-Ni 16%	550	910	[3]
	700	2800	
	750	3730	
Fe-Ni 30%	550	~ 900 [4]	[3-4]
	700	1370	
	750	1950	
Fe-Mn 12%	500	4100	[4-5]
	700	9080 [4] - 10660 [5]	
	750	11040	
Fe-Mn 20%	550	5480	[4]
	700	11720	
	750	14090	
Fe-Ni 10% Cr 18% (type AISI 304)	750	28750	[2]

XA0200954



En règle générale, les alliages Fe-Mn et Fe-Ni ont été utilisés à hautes températures ( $> 650^{\circ}\text{C}$ ) ; or l'intérêt de l'utilisation de cette méthode est de pouvoir l'appliquer directement aux températures des circuits de sodium car la détermination de l'activité en carbone à hautes températures ( $> 650^{\circ}\text{C}$ ) ne permet pas nécessairement de déduire cette activité à  $550^{\circ}\text{C}$ .

Cependant, afin de comparer nos résultats à ceux déjà connus, nous avons décidé d'étalonner les feuillets de Fe-Mn à  $550^{\circ}\text{C}$  et  $750^{\circ}\text{C}$ .

Les alliages Fe-Mn 20% ont été choisis car la solubilité du carbone à  $550^{\circ}\text{C}$  dans cet alliage est une des plus importantes comme le montre le tableau I et d'autre part, il a été jugé préférable d'utiliser un alliage qui soit monophasé aux températures d'utilisation ce qui est le cas du Fe-Mn 20% qui est entièrement austénitique à  $550^{\circ}\text{C}$ .

### 2.1 - Méthode d'étalonnage utilisée

La méthode utilisée consiste à mettre les alliages en équilibre thermodynamique avec des mélanges gazeux à activité en carbone connue comme les mélanges  $\text{CO}/\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ .

Le mélange  $\text{CO}/\text{CO}_2$  a été choisi car les mélanges  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  sont fortement influencés par la présence de traces de vapeur d'eau.

L'activité carburante  $a_c$  du mélange  $\text{CO}-\text{CO}_2$  peut être déterminée à partir de la constante d'équilibre  $K_1$  de la réaction :  $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2 \text{CO}$

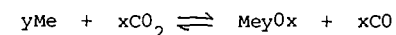
$$K_1 = \frac{p(\text{CO})^2}{p(\text{CO}_2) \cdot a_c}$$

$p(\text{CO})$  : pression partielle de  $\text{CO}$  du mélange gazeux.

$p(\text{CO}_2)$  : pression partielle de  $\text{CO}_2$  du mélange gazeux.

avec  $K_1 = 1,85 \cdot 10^{-2}$  à  $550^{\circ}\text{C}$  et  $K_1 = 2,32$  à  $750^{\circ}\text{C}$  [6].

Le mélange  $\text{CO}-\text{CO}_2$  est également oxydant vis-à-vis des métaux constitutifs de l'alliage étudié selon :



$K'$  : constante d'équilibre de réaction.

$$K' = \left( \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}} \right)^x$$

L'oxydation du métal Me en surface peut empêcher ou perturber sensiblement la diffusion du carbone dans le métal Me ; pour éviter cet inconvénient, il sera donc nécessaire de choisir les teneurs en  $\text{CO}$  et  $\text{CO}_2$  du mélange de manière à respecter la condition de non oxydation des constituants métalliques du témoin de carburation, soit :

$$\left( \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}} \right)^x > K'$$

Dans ces conditions, il faudrait que les pressions partielles de  $\text{CO}$  et  $\text{CO}_2$  soient inférieures à  $1,82 \cdot 10^{-6}$  atm et  $1,80 \cdot 10^{-10}$  atm à  $550^{\circ}\text{C}$  et à  $1,39 \cdot 10^{-3}$  atm et  $8,32 \cdot 10^{-7}$  atm à  $750^{\circ}\text{C}$  ( $a_c = 1$ ) pour ne pas oxyder le manganèse.

Par contre, pour le fer, les pressions partielles de  $\text{CO}$  et  $\text{CO}_2$  devront être inférieures à  $1,82 \cdot 10^{-2}$  atm et  $1,83 \cdot 10^{-2}$  atm à  $550^{\circ}\text{C}$  et à 1,35 atm et 0,79 atm à  $750^{\circ}\text{C}$  ( $a_c = 1$ ).

L'utilisation des mélanges  $\text{CO}/\text{CO}_2$  pour étudier la carburation du fer et a fortiori du nickel sans oxyder les matériaux est donc possible.

C'est pourquoi l'étalonnage des Fe-Mn 20% a été réalisé en deux étapes :

- étalonnage d'alliages Fe-Ni (conditions de non oxydation faciles à réaliser) dans les mélanges  $\text{CO}-\text{CO}_2$  à activité en carbone parfaitement connue. L'examen du diagramme binaire Fe-Ni montre que les limites de séparation entre le domaine monophasé  $\gamma$  et le domaine biphasé  $\alpha + \gamma$ , aux températures de  $750^{\circ}\text{C}$

et 550°C correspondent à des alliages renfermant respectivement au moins 8% et 30% de nickel [7].

- étalonnage de l'alliage Fe-Mn 20% dans du sodium, à activité de carbone fixée, en présence d'alliage Fe-Ni 30% à 550°C et d'alliage Fe-Ni 8% à 750°C.

## 2.2 - Conditions opératoires

Les feuillets de Fe-Ni 8% et Fe-Ni 30% ont approximativement 100 µm d'épaisseur, 20 mm de large et 50 mm de long et ont été fabriqués par le CNRS à Vitry à partir de métal pur laminé à l'épaisseur désirée.

Les témoins de carburation Fe-Mn 20% se présentent sous la forme de feuillets de 100 à 150 µm d'épaisseur, préparés par le CEA (Service de Recherches Métallurgiques Appliquées) selon le processus suivant :

- élaboration sous vide par lingot de 500 g,
- laminage à chaud à une épaisseur de 500 µm,
- laminage à froid de 15 à 20% en tension,
- recuit intermédiaire sous vide à 730°C (2 à 3 h).

Les feuillets bruts de laminage découpés en tronçons de 50 mm de long, subissent ensuite un traitement thermique préalable nécessaire pour éliminer la texture de laminage et obtenir la structure austénitique souhaitée à la température d'essai.

Les traitements effectués sont :

- FeNi 8% : recuit de 30 minutes à 900°C sous vide, suivi d'un refroidissement très rapide dans la zone froide du four.
- FeNi 30% : recuit d'une heure à 1000°C sous vide, suivi d'une trempe à l'hélium.
- FeMn 20% : recuit d'une heure à 1100°C sous pression réduite d'hydrogène (quelques torr), suivi d'un refroidissement très rapide dans la zone froide du four.

## 2.3 - Etalonnage des Fe-Ni dans les mélanges CO-CO<sub>2</sub>

Les plaquettes traitées thermiquement sont préalablement dégraissées lavées à l'eau déminéralisée, puis séchées à l'étuve. Elles sont ensuite mises en place dans les encoches du panier porte-échantillons qui sera introduit dans le four maintenu à la température d'essai (550°C ou 750°C) et balayé préalablement par le mélange carburant à étudier pendant environ une heure. Les échantillons à carburer sont ainsi portés à 550 ± 2 ou 750°C ± 2°C pendant une durée déterminée (cette durée de 12 jours à 550°C et 48 heures à 750°C a été déterminée préalablement) dans le mélange CO-CO<sub>2</sub> à activité connue. En fin d'essai, l'alimentation du four est coupée et le four est refroidi rapidement à l'aide d'un jet d'air comprimé dirigé sur la surface externe de la gaine de silice. La vitesse de refroidissement est en moyenne de 100°C/minute jusqu'à environ 300°C ; le refroidissement du four jusqu'à température ambiante n'excède pas deux heures.

### 2.3.1 - Durée nécessaire pour atteindre l'équilibre

Les résultats sont présentés sur la figure 1.

Les durées choisies ont été par la suite :

- 550°C : 11 jours
- 750°C : 48 heures.

### 2.3.2 - Etalonnage

Les résultats sont présentés sur les figures 2 et 3.

La comparaison de ces résultats avec la théorie de BODSWORTH montre qu'il y a un excellent accord à 750°C mais non à 550°C.

Ceci tend à confirmer que la théorie de Bodsworth est surtout valable pour les basses activités en carbone, quand les teneurs en Mn ou en Ni ne sont pas trop importantes et quand la température d'essai est suffisamment élevée (> 650°C).

#### 2.4 - Etalonnage du Fe-Mn 20% dans le sodium

Les plaquettes témoins de carburation, préalablement conditionnées comme précédemment, sont accrochées au couvercle du pot d'essai à l'aide de fils de nickel. Le pot est ensuite fermé puis raccordé à l'unité de remplissage en sodium, puis mis sous atmosphère contrôlée (mise sous vide suivie d'un remplissage en argon, cette opération étant répétée trois à quatre fois). Le pot est alors préchauffé à une température de l'ordre de 150°C, puis rempli avec environ 2,4 litres de sodium de qualité nucléaire. Pour les essais où le sodium subit un traitement de purification supplémentaire, un panier (fabriqué à l'aide d'une tôle en acier inoxydable) contenant environ 140 g d'alliage Ti-Zr est accroché préalablement, au couvercle du pot, en même temps que les plaquettes témoins de carburation.

Après refroidissement, le pot est calorifugé, puis mis en chauffe. En fin d'essai, le chauffage du pot est arrêté et le four est refroidi rapidement à l'aide d'un jet d'air comprimé dirigé sur le pot préalablement décalorifugé ; le refroidissement jusqu'à une température inférieure à 400°C n'excède pas la demi-heure.

Les éprouvettes sont ensuite retirées du pot d'essai préalablement vidangé à 150°C, puis immergées dans de l'alcool dès leur sortie du pot d'essais avant d'être séchées.

La teneur en carbone des plaquettes FeNi 8%, FeNi 30% et FeMn 20% est déterminée à l'aide d'un appareil LECO (combustion dans l'oxygène). Les plaquettes de FeMn 20% sont préalablement décapées chimiquement (HCl 10N) avant dosage du carbone pour éliminer en surface la couche démanaisée comme nous le verrons ultérieurement (§ 2.5).

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau II et sur les figures 1 et 2. Les courbes obtenues ont été comparées à celles calculées par Bodsworth [4]. Comme pour les Fe-Ni, il y a un accord satisfaisant à 750°C mais non à 550°C.

Les résultats expérimentaux ont permis d'établir les relations entre l'activité en carbone et la teneur en carbone des alliages.

$$\begin{aligned} 550^\circ\text{C} : \text{FeNi } 30\% \quad \log a_C &= -1,8085 + 0,7475 \log c \text{ (ppm)} \\ \text{FeMn } 20\% \quad \log a_C &= -1,8452 + 0,4613 \log c \text{ (ppm)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 750^\circ\text{C} \quad \text{FeNi } 8\% \quad \log a_C &= -3,4132 + 0,8567 \log c \text{ (ppm)} \\ \text{FeMn } 20\% \quad \log a_C &= -4,3215 + 0,9716 \log c \text{ (ppm)} \end{aligned}$$

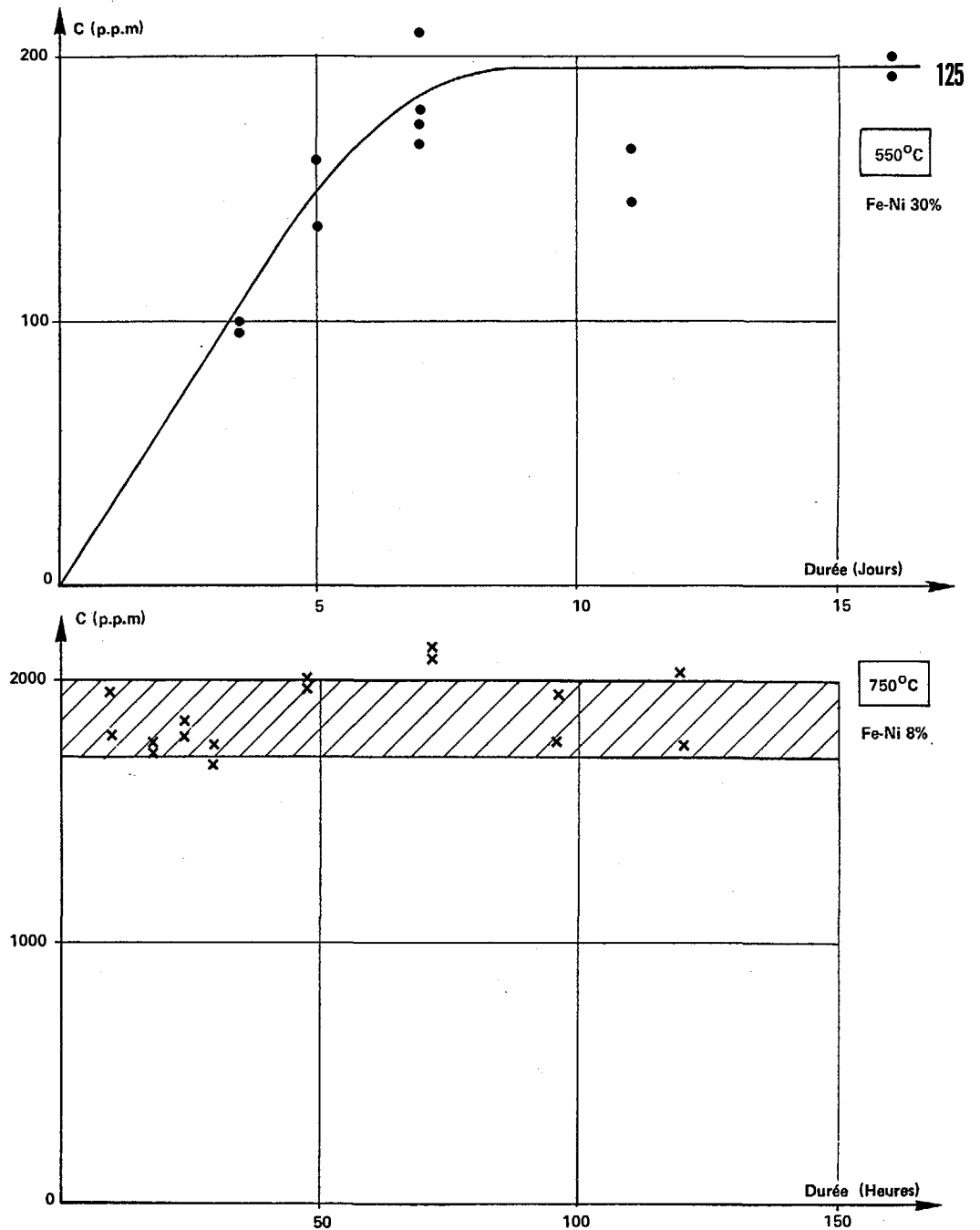


Figure 1 : Détermination de la durée d'établissement de l'équilibre entre les Fe-Ni et les mélanges CO-CO<sub>2</sub>.

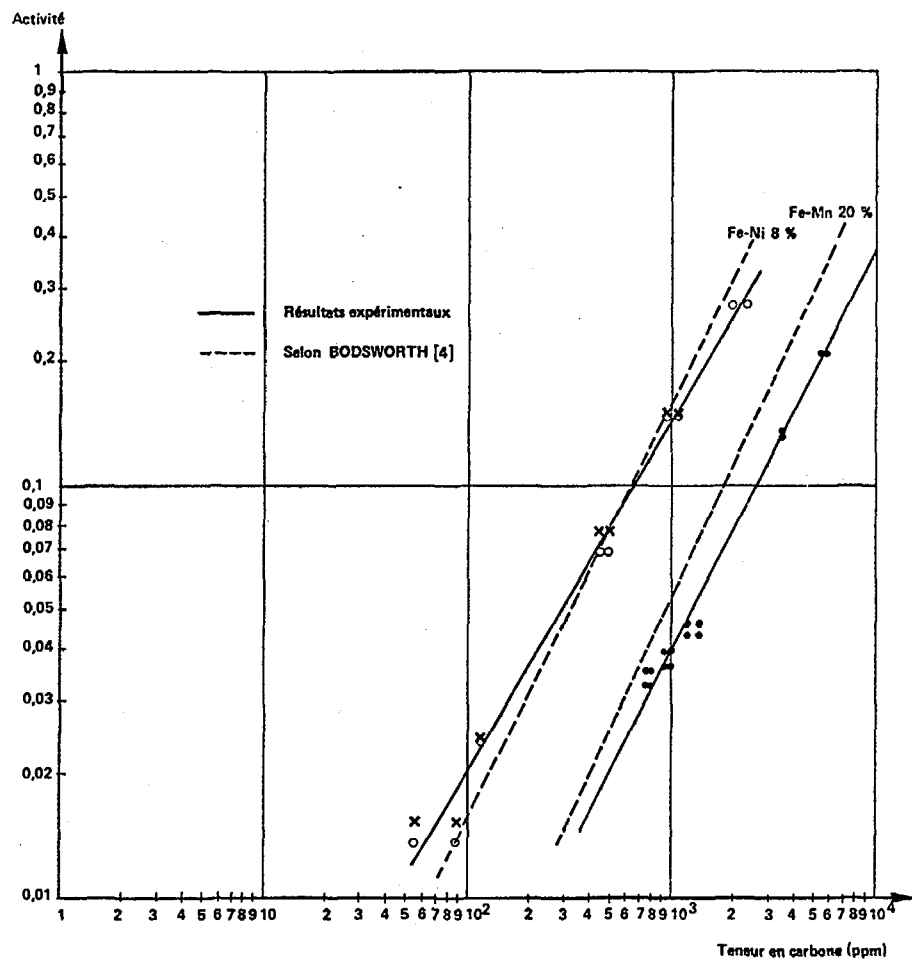


Figure 2 : Courbes d'étalonnage à 750°C des alliages Fe-Ni 8% dans les mélanges CO-CO<sub>2</sub> et des alliages Fe-Mn 20% dans le sodium.

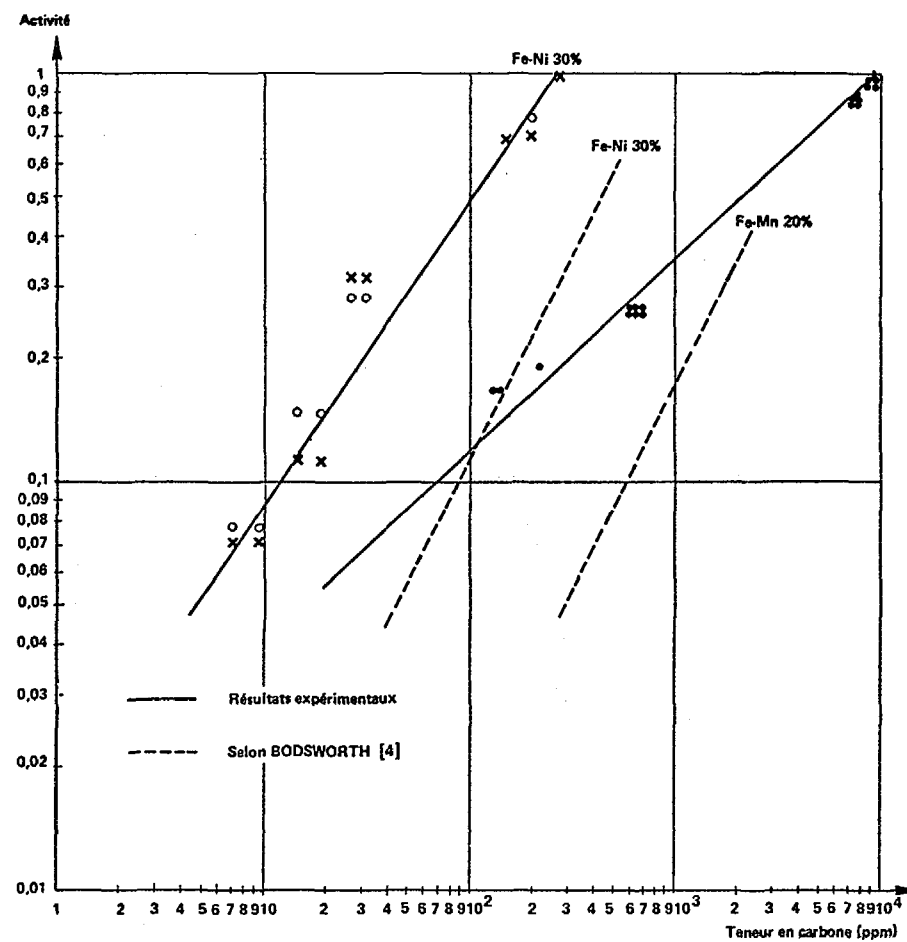


Figure 3 : Courbes d'étalonnage à 550°C des alliages Fe-Ni 30% dans les mélanges CO-CO<sub>2</sub> et des alliages Fe - Mn 20% dans le sodium.

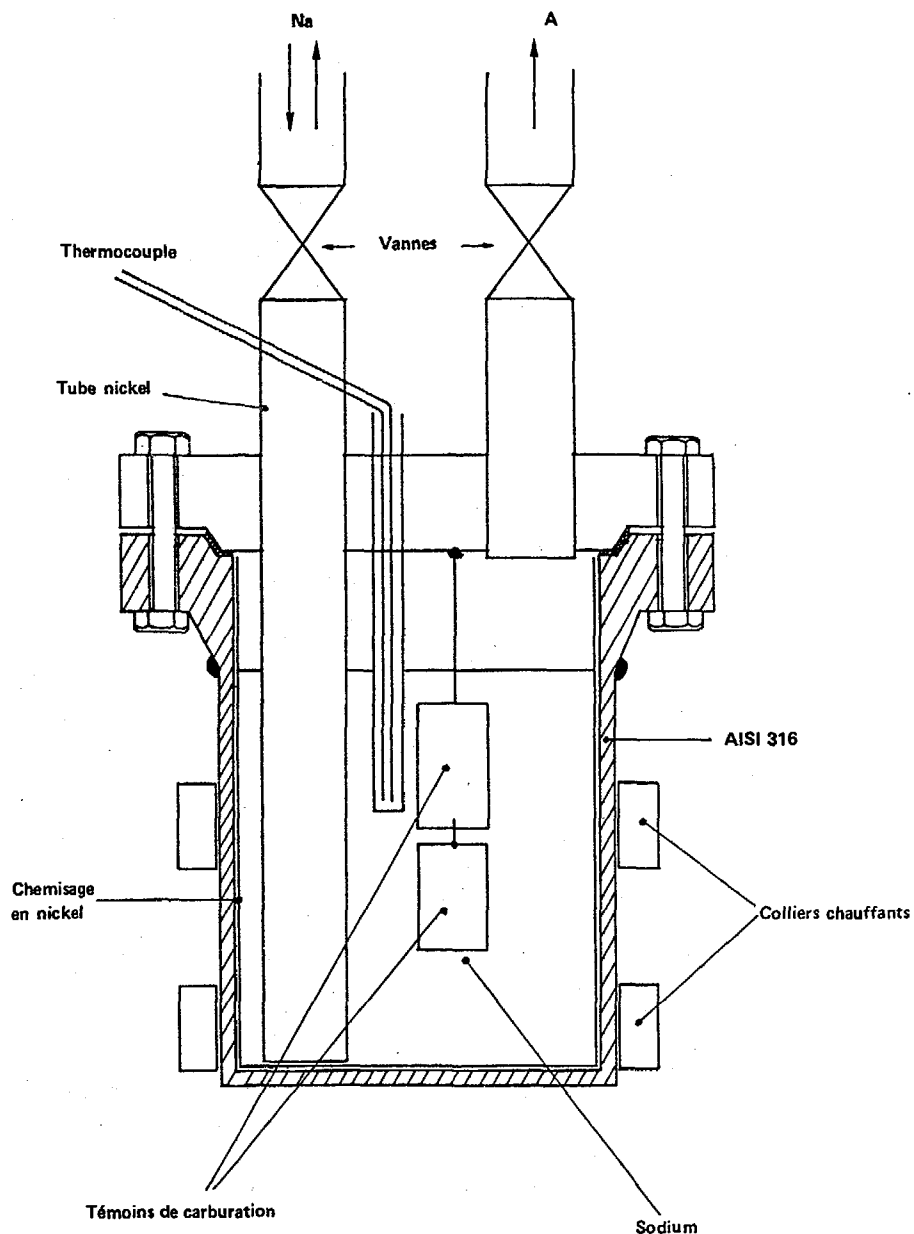


Figure 4 : Schéma du dispositif utilisé pour les essais en sodium

Les informations suivantes peuvent être tirées des résultats expérimentaux :

- l'utilisation de l'alliage Fe-Mn 20% en tant que témoin de carburation, permet d'avoir une meilleure sensibilité dans le domaine des activités inférieures à  $10^{-1}$  que celle donnée par les Fe-Ni.

- une étude comparée des niveaux d'activité mesurés expérimentalement sur des boucles sodium lors de précédentes études (Tableau III) montre que l'activité la plus probable dans du sodium propre circulant dans une boucle en acier inoxydable devrait être de l'ordre de  $3.10^{-3}$  à  $750^{\circ}\text{C}$  ; ce niveau peut être facilement mesuré par le Fe-Mn.

TABLEAU II - ÉTALONNAGE DES TÉMOINS EN Fe-Mn 20% DANS LE SODIUM

Température $^{\circ}\text{C}$	Teneur en carbone après essai des Fe-Mn 20% (ppm)	Fe-Ni 30% ( $550^{\circ}\text{C}$ ) Teneur en carbone (ppm)	Activité en carbone du sodium *
750	5500 - 5470	1560 - 1560	0,21
750	954 - 990	200 - 222	0,036 - 0,039
750	1200 - 1350	246 - 264	0,043 - 0,046
750	788 - 772	178 - 196	0,032 - 0,035
750	3460 - 3460	895 - 905	0,130 - 0,132
550	8870 - 9200	247 - 242	0,955 - 0,940
550	6470 - 6270	209 - 210	0,843 - 0,845
550	7470 - 7440	222 - 222	0,882
550	673 - 652 - 695	44 - 42	0,263 - 0,254
530	216	49	0,188
550	135 - 138	24	0,167

\* Calculé d'après les Fe-Ni 8% ( $750^{\circ}\text{C}$ ) et Fe-Ni 30% ( $550^{\circ}\text{C}$ ) étalonnés préalablement dans les mélanges  $\text{CO-CO}_2$ .

TABLEAU III - ACTIVITÉS EN CARBONE DU SODIUM EN BOUCLE DÉTERMINÉES EXPÉRIMENTALEMENT.

Méthodes	Activité en carbone mesurée	Activité en carbone calculée à 550°C	Références
Carbonemètre	1,71.10 <sup>-4</sup> (760°C)	5,1.10 <sup>-3</sup>	[9]
Témoin de carburation (Acier inox)	3.10 <sup>-3</sup> (700°C)	3,94.10 <sup>-2</sup>	[9]
Témoin de carburation (Acier inox)	4.10 <sup>-3</sup> (700°C)	5,21.10 <sup>-2</sup>	[10]
Témoin de carburation (Acier inox)	9,7.10 <sup>-3</sup> (600°C)	2,52.10 <sup>-2</sup>	[10]
Carbonemètre	2,23.10 <sup>-4</sup> (750°C)	5,8.10 <sup>-3</sup>	[3]
Témoin de carburation (Acier inox)	2,8.10 <sup>-3</sup> (750°C)	7,3.10 <sup>-2</sup>	[3]
Carbonemètre	1,44.10 <sup>-2</sup> (600°C)	3,75.10 <sup>-2</sup>	[11]
Témoin de carburation (Fe-Ni 8%)	3,27.10 <sup>-3</sup> (700°C)	4,29.10 <sup>-2</sup>	[5]

En admettant que les solutions de carbone dans le sodium obéissent à la loi de Henry et que les interactions entre les diverses espèces carburées sont négligeables, l'activité en carbone à 550°C peut être calculée ; elle serait de l'ordre de 4 à 5.10<sup>-2</sup> si l'activité est égale à 3.10<sup>-3</sup> à 750°C, car :

$$a_C^T = \frac{C_{Na}}{C_S^T}$$

C<sub>Na</sub> = teneur en carbone dans le sodium

C<sub>S</sub><sup>T</sup> = solubilité du carbone dans le sodium à la température T

$$\text{avec } \log C_S^T = 7,646 - \frac{5970}{T(^{\circ}\text{K})} \quad [8].$$

Des mesures expérimentales ont été réalisées dans le circuit secondaire de Phénix à l'aide d'alliages Fe-Mn 20% à 550°C. Les activités en carbone déterminées ont été de 7,8.10<sup>-2</sup> (40 ppm C dans le feuillard Fe-Mn 20%). Cette valeur est en accord avec les valeurs calculées ci-dessus.

## 2.5 - Etude de la démanganisation des feuillards dans le sodium

128

Après séjour dans le sodium, à haute température, une perte en manganèse à la surface des échantillons Fe-Mn 20% a été mise en évidence par micro-analyse X et micrographie. La figure 5 montre cette perte en manganèse pour un échantillon ayant séjourné 5000 h dans le sodium à 550°C et la figure 6 celle d'un échantillon après 48 h à 750°C.

La présence de cette couche perturbée en surface peut avoir deux inconvénients :

- elle peut fausser par défaut le dosage du carbone dans l'alliage utilisé, la couche démanganisée étant fortement appauvrie en carbone (la solubilité du carbone dans une matrice en fer étant très faible). Cet inconvénient peut être évité en découpant la plaquette de FeMn 20% dans un bain acide (HCl 10 N) avant dosage du carbone.

- la présence d'une telle couche en surface peut également perturber l'établissement de l'équilibre thermodynamique entre le sodium et le témoin de carburation.

Afin de vérifier ceci, des essais complémentaires ont été réalisés avec des feuillards préalablement démanganisés ; les résultats obtenus ont été pratiquement identiques à ceux obtenus avec des feuillards homogènes ce qui semble montrer que la couche démanganisée n'empêche pas la mise en équilibre du témoin avec le sodium.

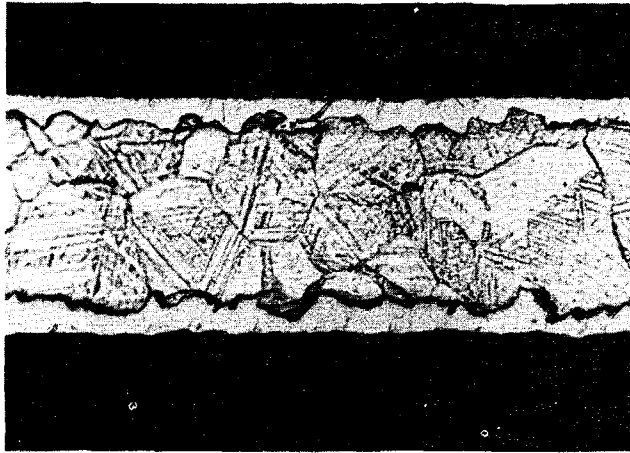
## 3 - ETUDE DE L'UTILISATION DES ACIERS INOXYDABLES

L'utilisation des aciers inoxydables austénitiques a été envisagée par le CEA pour les raisons suivantes :

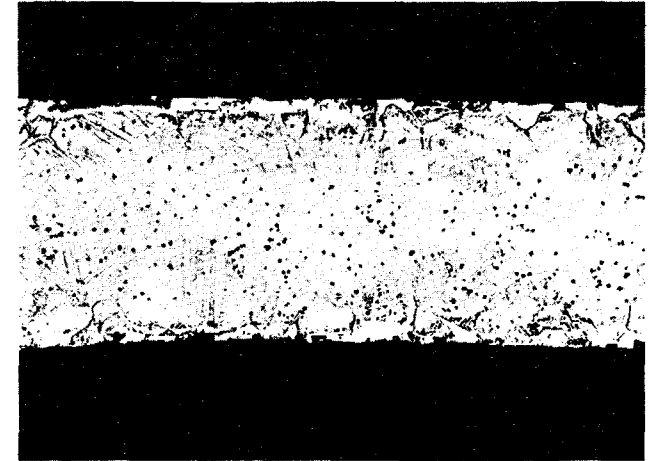
- matériaux identiques à ceux utilisés pour l'élaboration des composants des circuits primaires,

- coût moins onéreux de fabrication des feuillards,

- d'après la formule de calcul de NATESAN et KASSNER [3] pour les alliages Fe - C<sub>x</sub> - Ni, à pouvoir carburant égal, la teneur en carbone de l'acier est plus importante que pour le nickel pur ou pour les alliages binaires Fe - Ni et Fe - Mn (pouvoir carburant calculé d'après la formule de BODSWORTH [4],



x400 : Attaque nital 5%



x400 : Attaque nital 5%

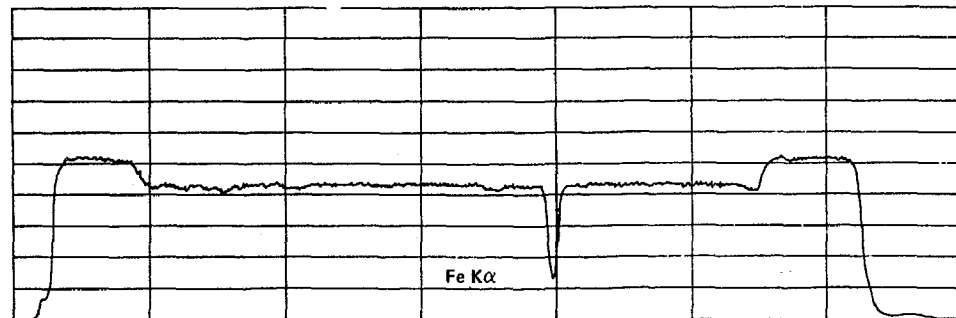
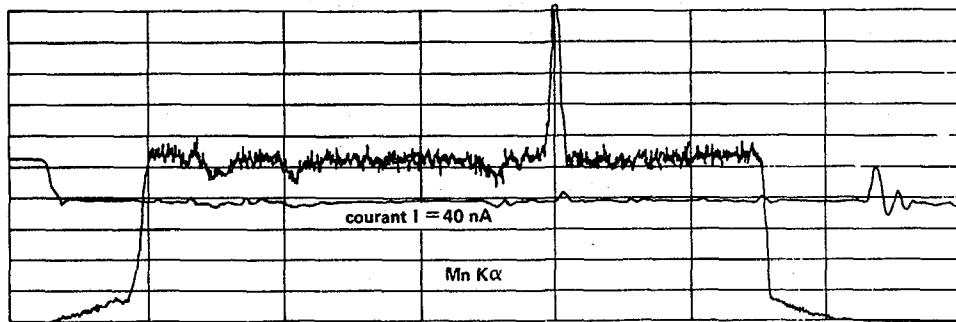


Figure 5 : Échantillon de Fe-Mn 20% après 5000 heures à 550°C dans le sodium.

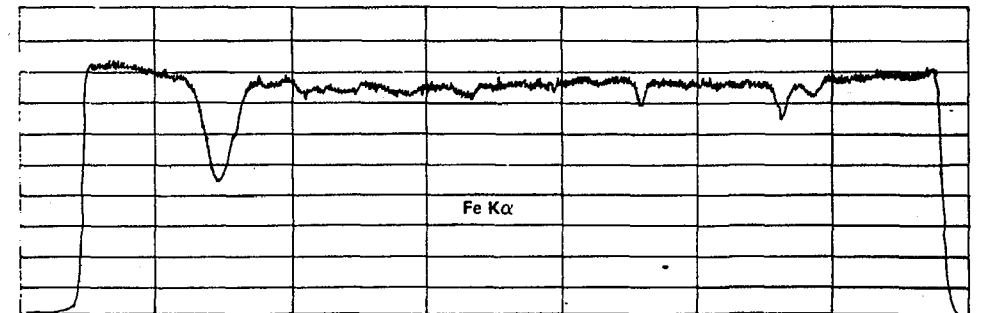
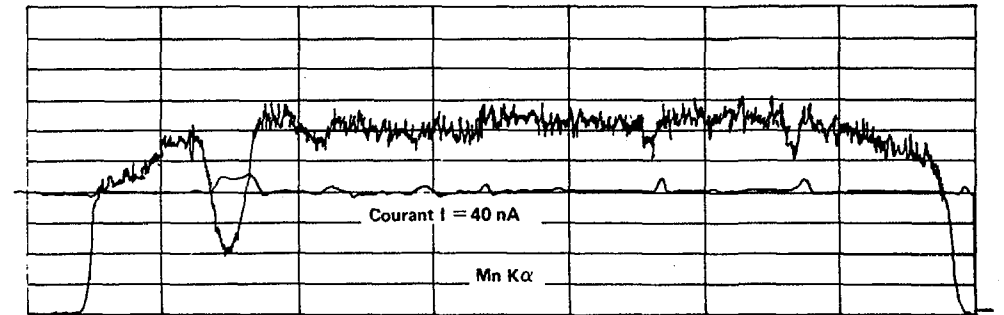


Figure 6 : Échantillon de Fe-Mn 20% après 48 heures à 750°C dans le sodium.



- le traitement thermique préalable d'hypertrépe permet de conserver une structure austénitique jusqu'à la température ambiante,

- la transformation superficielle en sodium à haute température n'affecte qu'une très faible épaisseur d'alliage ; il paraît possible d'éviter un traitement de décapage après essai.

TABLEAU IV - PREPARATION DES ECHANTILLONS

Alliage	Epaisseur (µm)	Traitement thermique	Traitement de surface
304L	100	Quelques minutes à 1050°C	Nettoyage aux ultrasons dans le méthylal, puis dans l'éthanol
316L	120	Trempe sous argon	
	55		
Fe-Mn 2 %	120	Une heure à 1050°C Trempe sous hydrogène	-

Cependant, l'utilisation de ces feuilards peut présenter certains inconvénients :

- les durées nécessaires à la mise en équilibre par rapport au carbone du sodium sont beaucoup plus importantes que dans le cas des alliages binaires [3].

C'est une méthode, qui, dans l'absolu, ne permet pas d'assurer que l'équilibre thermodynamique avec le sodium est atteint et qui risque ainsi de ne pas être reproductible.

- les teneurs mêmes faibles en éléments stabilisants (Ti, Zr ...) dans les alliages sont susceptibles, pour les faibles activités, de fausser les résultats obtenus d'après la formule de NATESAN et KASSNER [2].

- l'influence de la teneur de 2 à 3% en poids en molybdène dans l'acier 316L peut jouer un rôle sur la diffusion du carbone.

C'est la raison pour laquelle une étude est actuellement en cours au CEA pour connaître les possibilités d'utilisation de ces feuilards en aciers inoxydables austénitiques aux températures maximales des circuits de sodium et pour comparer les résultats avec ceux obtenus par les feuilards en Fe-Mn et les carbonemètres.

TABLEAU V - RESULTATS OBTENUS AVEC DES FEUILLARDS EN ACIERS INOXYDABLES AUSTENITIQUES.

Température (°C)	Durée (Heure)	Alliage			
		316 L 120 µm	316 L 55 µm	304 L 120 µm	Fe - Mn 20% 120 µm
550	Essai en statique 1000 à 3000	$(3 \pm 0,5) \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$ 1000 h seulement	$(3 \pm 0,5) \times 10^{-3}$	$(22 \pm 3) \times 10^{-3}$
600	1000 ou 2000	$(5,5 \pm 0,5) \times 10^{-3}$	$(11 \pm 0,5) \times 10^{-3}$	$(5 \pm 0,7) \times 10^{-3}$	$(4 \pm 1) \times 10^{-3}$
	2000	$(6 \pm 1) \times 10^{-3}$	$(12 \pm 1) \times 10^{-3}$	$(4,3 \pm 0,5) \times 10^{-3}$	$(20 \pm 6) \times 10^{-3}$
650	1000 ou 1350	$(11 \pm 1) \times 10^{-3}$	$(16 \pm 1) \times 10^{-3}$	$(4 \pm 1) \times 10^{-3}$	$(12 \pm 1) \times 10^{-3}$
	1350	$(9,3 \pm 0,5) \times 10^{-3}$	$(7 \pm 3) \times 10^{-3}$	$(2,1 \pm 0,5) \times 10^{-3}$	$(20 \pm 5) \times 10^{-3}$
600	Boucle (5 m/s)	$8 \cdot 10^{-4}$	-	-	-
650	"	$4 \cdot 10^{-4}$	-	-	-

3.1 - Essais préliminaires

3.1.1 - Préparation des échantillons

Le tableau IV recense les divers matériaux utilisés, les traitements thermiques qu'ils ont subis ainsi que leur préparation de surface.

3.1.2 - Essais réalisés

En sodium statique

Dans des pots en acier austénitique 316, le sodium est purifié au préalable sur piège froid à 110°C.

a) A 550°C, durées de 1000 à 5000 heures dans le même pot, échantillons retirés périodiquement.

b) A 600 et 650°C, durées de 1000 et 2000 heures.

### En sodium dynamique

a) Essai aux températures de 600 et 650°C dans un circuit à vitesse du sodium 5 m/s, piège froid 110°C.

Echantillons 316L, épaisseur : 120 microns.

b) Essai à 600°C, vitesse du sodium : 0,2 m/s, piège froid : 110°C.

Echantillons 316L, 120 et 55 microns, 304L et Fe-Mn : 120 microns.

#### 3.1.3 - Résultats obtenus

Les pouvoirs carburants sont calculés d'après NATESAN et KASSNER pour les alliages classiques et d'après BODSWORTH pour le Fe-Mn.

Les résultats sont indiqués dans le tableau V.

#### 3.1.4 - Discussion

Les résultats obtenus permettent de faire les remarques suivantes :

- Il est normal que les pouvoirs carburants mesurés en zone chaude d'un circuit anisotherme soient inférieurs à ceux mesurés en sodium statique à la même température. Dans ce cas, la teneur en carbone dépend surtout de l'état de carburation de la paroi du pot, il n'y a pas le "piège" constitué par la zone froide d'un circuit.

Il n'est pas possible de comparer des résultats obtenus dans des pots différents.

- Dans chaque pot, les mesures des pouvoirs carburants d'après les divers échantillons, présentent des écarts pouvant atteindre un ordre de grandeur.

A 550°C, les écarts entre Fe/Mn et aciers classiques, dont les résultats sont groupés, pourraient s'expliquer par les temps relativement courts d'exposition en sodium et par les différences entre les deux méthodes de calcul.

A 600 et 650°C, il ne paraît pas possible d'expliquer les différences importantes entre les pouvoirs carburants des divers échantillons. 131

Les résultats différents des feuillards 316L du même lot du matériau, mais d'épaisseur différente, font craindre que des gradients de concentration en carbone n'existent dans le sodium statique du pot.

Cependant, en sodium dynamique, les échantillons en AISI 316L ont donné des résultats encourageants.

- A cause des perturbations dues aux parois des pots d'essais, les essais en statique seront dorénavant réalisés dans des creusets en nickel avec une agitation continue du sodium.

#### REFERENCES

- [1] J. CHIPMAN, Met. Trans., 3, 55 (1972)
- [2] K. NATESAN, T.F. KASSNER, Met. Trans., 4, 2557-66 (1973)
- [3] K. NATESAN, T.F. KASSNER, Nuclear Technology, 19, 46-57 (1973)
- [4] C. BODSWORTH, I.H. DAVIDSON, D. ATKINSON, Trans. Met. Soc. AIME, 242, 1135 (1968)
- [5] M. F. ROCHE, J.W. ALLEN, R.J. MEYER and F.A. CAFASSO, ANL 8017 (1973)
- [6] R. W. GURRY, J. of Metals Trans. AIME 193, 671-87 (1950)
- [7] K. NATESAN and T.F. KASSNER J of Nuclear Materials 37, 223-35 (1970)
- [8] B. LONGSON, A.W. THORLEY, J Appl. Chem. 70, 372 (1970)
- [9] V.P. BHAT, H.U. BORGSTEDT, Z. PERIC, G. WITTIG  
Rapport KfK (Juin 1979)
- [10] H.U. BORGSTEDT, "Hauptversammlung 1979 der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde in den Haag. 5-8 Juin 1979
- [11] R.C. ASCHER, L. BRADSHAW, T.B.A. KIRSTEIN and A.C. TOLCHARD,  
AERE - R8296 (1976).