

## BEHAVIOUR OF FAST FUEL BUNDLES UNDER IRRADIATION (Comportement sous irradiation d'un faisceau d'aiguilles combustibles rapides)

G. MARBACH, P. MILLET, J. ROBERT, A. LANGUILLE

*Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache,  
Département de Développement des Eléments Combustibles,  
B.P. No. 1, F-13115 Saint-Paul-lez-Durance, France*

### ABSTRACT.

In the French fast neutron reactor fuel bundle design, correct pin spacing is ensured by a wire wound in a spiral around each pin and secured at both ends. The bundle is then placed inside a hexagonal tube.

Deformations of these three components (pins, spacer wire and hexagonal tube) in the reactor are different. Although steel swelling under irradiation affects all three of them, the significance of this phenomenon may vary from one to the other (because of temperature differences, for example). Moreover, other deformation mechanisms, peculiar to each of the components, exist (such as creep caused by fission gas pressure or that due to the sodium dynamic pressure).

Current experience relates to bundles in which clad deformation is greater than that of the hexagonal tube, whereas the relative spacer wire/clad deformation may vary. Based on this, two types of bundles may be considered :

- 1) those in which there is no wire/clad interaction (wire swelling is greater than clad deformation). The wire plays a passive role. After closure of manufacture gaps, the increase in clad diameters leads to a bundle/hexagonal tube interaction which results in bending and ovalization of the pins.
- 2) those in which there is a wire/clad interaction (wire swelling is less than clad deformation). In this case the wire plays an active role. It causes bending and ovalization of the clads from the first stages of deformation. After closure of manufacturing gaps, the pin bundle/hexagonal tube interaction aggravates this phenomenon.

The deformations and loads for each case are analyzed using simple models.

By considering only a single row of pins, it is possible to estimate the distribution of interaction forces and to determine their relative contribution to ovalization and bending as well as pin ovalization distribution.

Results given by these simple linear models are compared with experimental observations on fuel assemblies. Satisfactory agreement is found providing that the displacement angle of the spacer wires remains limited.

Dans la conception française des faisceaux d'éléments combustibles de réacteurs à neutrons rapides, l'espacement entre aiguilles est assuré par un fil enroulé en hélice autour de chacune d'elles et fixé à chaque extrémité. Ce faisceau est placé à l'intérieur d'un tube hexagonal.

En réacteur, les déformations de ces trois composants (aiguilles, fil espaceur et tube hexagonal) sont différentes en liaison avec la répartition des températures et le champ de contraintes propre à chacun. Lorsque la déformation des aiguilles est supérieure à celle du tube hexagonal une interaction peut se produire.

#### 1. Description de l'évolution du faisceau

Nous distinguerons deux types de faisceaux suivant que le fil espaceur se déforme ou non plus vite que la gaine.

##### 1.1. Faisceaux du type I.

Le gonflement du fil espaceur est supérieur à la déformation de la gaine. Ces deux composants se comportent de manière indépendante. L'augmentation du diamètre des gaines amène dans un premier temps, les fils espaceurs des aiguilles périphériques en contact avec le tube hexagonal. Puis, les jeux de fabrication étant rattrapés, il se produit une flexion et une ovalisation des aiguilles (fig. 1). Enfin, la flexion des aiguilles devient telle qu'elles viennent à leur tour au contact du tube hexagonal. Le faisceau est alors bloqué dans son enveloppe ; les déformations supplémentaires des aiguilles ne peuvent être accomodées que par leur ovalisation ou le marquage du tube hexagonal.

##### 1.2. Faisceau de type II.

Le gonflement du fil espaceur est inférieur à la déformation de la gaine. Ces deux composants ne se comportent plus de façon indépendante. Lorsque les gaines se déforment il y a, dans un premier temps, flexion et ovalisation des aiguilles sous l'action du fil espaceur. Si cette flexion est assez importante, le rattrapage des jeux de fabrication se termine lorsque les gaines des aiguilles périphériques (et non plus les fils espaceurs de ces aiguilles) viennent au contact du tube hexagonal.

Ensuite l'interaction du faisceau avec le tube hexagonal se superpose à l'action du fil sur l'aiguille. Elle entraîne une diminution de l'amplitude de flexion et une augmentation de l'ovalisation de l'aiguille (fig. 1). Enfin lorsque les fils des aiguilles périphériques viennent en contact avec le tube hexagonal (par suite de la diminution de la flexion) le faisceau est bloqué dans son enveloppe et l'on se retrouve dans la même situation que pour les faisceaux de type I.

Ainsi pour les deux types de faisceaux, on est amené à distinguer trois phases dans l'évolution de l'interaction.

- . Une première phase de rattrapage des jeux de fabrication avec ou non interaction entre fil et gaine.
- . Une seconde phase d'interaction modérée. La flexion ou la modification de la flexion des aiguilles permet d'accomoder une partie de la déformation des gaines.
- . Une troisième phase d'interaction forte. Les déformations supplémentaires se traduisent uniquement par l'ovalisation des aiguilles ou le marquage du tube hexagonal.

2. Modélisation des interactions mécaniques.

Nous ne nous intéresserons ici qu'à la seconde phase d'interaction pour les deux types de faisceaux.

Nous avons déterminé les conditions d'évolution de chaque système en écrivant que les déformations doivent être statiquement et cinétiquement admissibles. Afin de simplifier la résolution de ce système très fortement hyperstatique, nous avons été amené à faire les hypothèses suivantes :

- Dans une direction d'interaction donnée, chaque rangée d'aiguilles est indépendante. Ceci permet de se ramener à un problème plan.
- Les déformations dues au gonflement des aciers ou au champ de contrainte propre à chaque composant sont constantes dans toute la rangée.
- Les fils espaceurs restent bien positionnés.
- La planche 1 regroupe les caractéristiques du modèle et les notations employées.

2.1 Détermination des équations d'évolution.

On écrit donc :

- Une condition d'équilibre statique qui traduit la compatibilité des déformations avec la géométrie du faisceau.

Pour le faisceau I.

$$\frac{\partial f(n)}{\partial E^2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\partial \omega(i)}{\partial E^2} + \frac{1}{4} \frac{\partial \omega(n)}{\partial E^2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-n} \frac{\partial \omega(i)}{\partial E^2} + \frac{1}{4} \frac{\partial \omega(N+1-n)}{\partial E^2} = S_1 \quad (1)$$

avec

$$S_1 = (N+1)(\alpha_p - \alpha_k) d + N(1 - \alpha_k) D \quad (2)$$

Pour le faisceau II.

$$-\frac{\partial f(n)}{\partial E^2} + \frac{1}{2} \sum_{i=n+1}^N \frac{\partial \omega(i)}{\partial E^2} + \frac{1}{4} \frac{\partial \omega(n)}{\partial E^2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N+1-n} \frac{\partial \omega(i)}{\partial E^2} + \frac{1}{4} \frac{\partial \omega(N+1-n)}{\partial E^2} = S_2 \quad (3)$$

avec

$$S_2 = (N-1)(\alpha_p - \alpha_k) d + N(1 - \alpha_k) D - 2 \alpha_k \cdot \nu^0 \quad (4)$$

- une condition d'équilibre cinématique qui traduit l'équilibre des éléments du système physique sous l'action des forces de liaison.

Pour le faisceau I.

$$2 \sum_{i=n+1}^N \frac{\partial f(i)}{\partial E^2} + \frac{f}{S_0} \frac{\partial \omega(n)}{\partial E^2} = 0 \quad (5)$$

Pour le faisceau II.

$$2 \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\partial f(i)}{\partial E^2} + \frac{f}{S_0} \frac{\partial \omega(n)}{\partial E^2} = S_3 \quad (6)$$

avec

$$S_3 = 2 \cdot (n-1) \frac{\partial (2 \nu^0)}{\partial E^2} + \frac{f}{S_0} \beta \quad (7)$$

La résolution du système de 2N équations linéaires contenues dans les relations (1), (2) et (5) (faisceau I) ou (3), (4), (6) et (7) (faisceau II) permet de calculer les vitesses de flexion  $\frac{\partial f}{\partial E^2}$  et d'ovalisation  $\frac{\partial \omega}{\partial E^2}$  en variable de gonflement. On passe facilement à la flexion et à l'ovalisation par :

$$f(n) = 2 \cdot \nu^0 + (E^0 - E^2_0) \frac{\partial f(n)}{\partial E^2} \quad (8)$$

$$\omega(n) = \beta \cdot E^2 + (E^2 - E^2_0) \frac{\partial \omega(n)}{\partial E^2} \quad (9)$$

3. Résultats des calculs. Liaison avec les résultats expérimentaux.

3.1 Faisceau I.

Nous allons effectuer le calcul dans le cas d'une rangée moyenne à 9 aiguilles. Les résultats ainsi que les points expérimentaux sont regroupés planche 2.

Les valeurs numériques utilisées sont :

$$E^2_0 = 0 \quad \alpha_p = 1,0 \quad \alpha_k = 0,22 \quad \nu^0 = 0 \quad \beta = 0$$

### 3.2. Faisceau II.

Nous prenons pour ce faisceau une rangée moyenne de 13 aiguilles ; les résultats ainsi que des points expérimentaux sont exposés planche 2.

Les valeurs numériques prises sont :

$$\varepsilon_0^{\delta} = 3\% \quad \varepsilon^{\delta} = 4\% \quad \alpha_f = 0,07 \quad \alpha_t = 0,54 \quad \frac{\partial(\Delta \lambda)}{\partial \varepsilon^{\delta}} = 95 \text{ mm} \quad \beta = 1 \text{ mm}$$

### 3.3. Commentaires.

Pour les deux types de faisceau, les calculs montrent une évolution de l'ovalisation et de la flexion le long de la rangée d'aiguilles. Pour l'ovalisation le maximum se trouve du côté où il y a contact avec le tube hexagonal que ce soit par l'intermédiaire du fil (faisceau de type I) ou par l'intermédiaire de la gaine elle-même (faisceau de type II). La flexion passe par un extrémum au milieu de la rangée ; c'est un minimum pour les faisceaux de type I et un maximum pour les faisceaux de type II.

La comparaison des calculs d'ovalisation avec les résultats expérimentaux que nous possédons montre un bon accord. On retrouve en particulier le sens de variation le long de la rangée prévu par le calcul pour les deux types de faisceaux. Par ailleurs, ces résultats montrent que l'ovalisation varie peu dans une direction perpendiculaire au plan d'interaction, ce qui justifie dans une certaine mesure l'hypothèse de l'indépendance des rangées d'aiguilles. Les résultats expérimentaux présentent bien sûr une dispersion due à de multiples causes : déplacement des fils espaceurs, hétérogénéité du gonflement dans le faisceau...

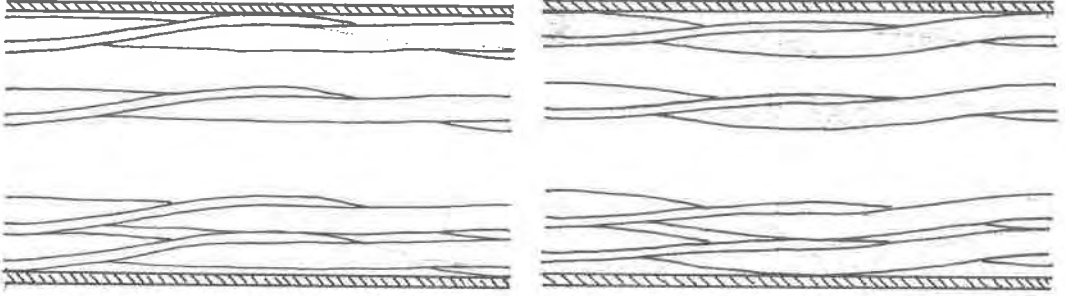
### 4. Conclusion.

La modélisation de l'interaction faisceau d'aiguilles-tube hexagonal à partir de la déformation d'une seule rangée d'aiguilles conduit à un système simplifié dont les résultats sont en bon accord avec les observations expérimentales.

FAISCEAUX LINEAIRES EN DEUXIEME PHASE

FAISCEAU I

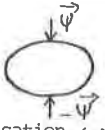
FAISCEAU II



CARACTERISTIQUES GENERALES

Faisceau		Comportement en réacteur
Nombre d'aiguilles	N	Gonflement diamétral gaine $\frac{\Delta D}{D} = \epsilon^{\gamma}$
Diamètre de gaine	D	Gonflement diamétral fil $\frac{\Delta d}{d} = \alpha_f \cdot \epsilon^{\gamma}$
Diamètre du fil	d	Gonflement tube hexagonal $\frac{\Delta A}{A} = \alpha_t \cdot \epsilon^{\gamma}$
Pas du fil	p	
Cotes entre-plats du tube hexagonal	A	

OVALISATION DES GAINES



ovalisation  $\omega$   
 $\omega = D_{max} - D_{min}$

$$\omega = \underbrace{2 \delta_2 \psi}_1 + \underbrace{\beta \epsilon^{\gamma}}_2$$

- (1) Terme d'écrasement
- (2) Ovalisation due à une interaction fil-gaine.

Au début de la 2ème phase.

$$\omega_0 = \beta \cdot \epsilon^{\gamma}$$

FLEXION DES AIGUILLES



Flèche de l'aiguille : f

$$f = \underbrace{f_0 \cdot \phi}_1 + \underbrace{2 \cdot 2v}_2$$

- (1) Flexion due à une interaction mécanique
- (2) Flexion due à une interaction fil-gaine.

Au début de la 2ème phase.

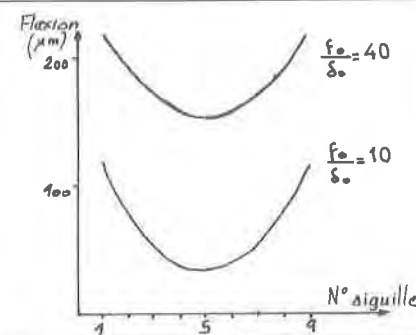
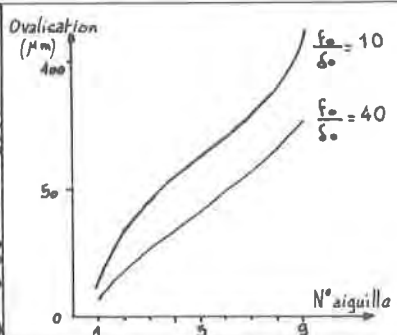
$$f_0 = 2 \cdot 2v^0$$

# Comportement des faisceaux I et II

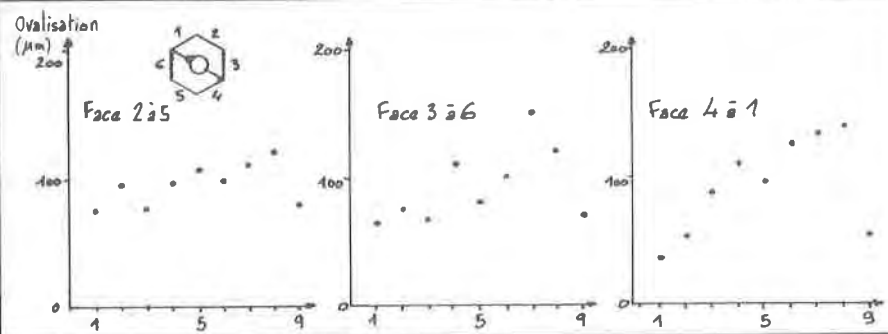
Planche 2

Faisceau I

Résultats des calculs  
 $\epsilon_0 - \epsilon_0 = 1\%$  •  $\epsilon_0 = 0$

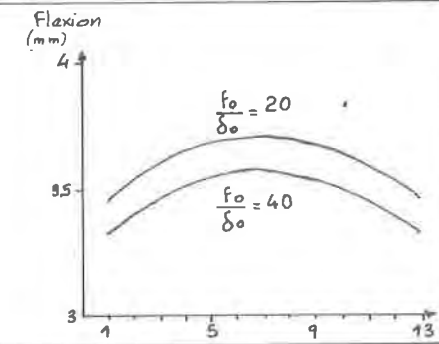
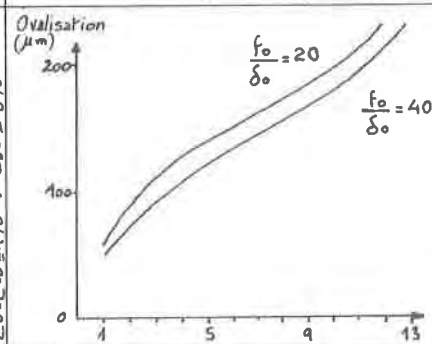


Résultats expérimentaux



Faisceau II

Résultats des calculs  
 $\epsilon_0 - \epsilon_0 = 1\%$  •  $\epsilon_0 = 3\%$



Résultats expérimentaux

