

FR 4801740

DEFORMATION DES AIGUILLES AVEC FIL ESPACEUR EN PRESENCE
DE GONFLEMENT ET DE FLUAGE D'IRRADIATION

iv's

ROUSSEAU J. - BOUTARD J.L - COURTOIS C. - LEMOINE P.
CEA CADARACHE/SACLAY FRANCE

RESUME

Le gonflement différentiel sous irradiation entre la gaine et le fil espaceur conduit, en raison de l'existence du fluage d'irradiation à une mise en hélice des aiguilles. On établit ici les lois qui régissent cette déformation.

I. INTERACTION FIL-AIGUILLE ET DEFORMATION DE GAINÉ

Dans un assemblage où l'espacement des aiguilles est réalisé au moyen de fils enroulés en hélice, les dilatations différentielles entre gaine et fil, dues tant à la différence de nature ou d'état métallurgique des matériaux qu'à leur différence de température à un niveau donné, peuvent conduire soit à un décollement du fil, soit à une interaction mécanique fil-gaine entraînant des déformations de l'aiguille. Celles-ci peuvent être prévues assez aisément en considérant l'influence de la tension du fil sur l'équilibre de la gaine.

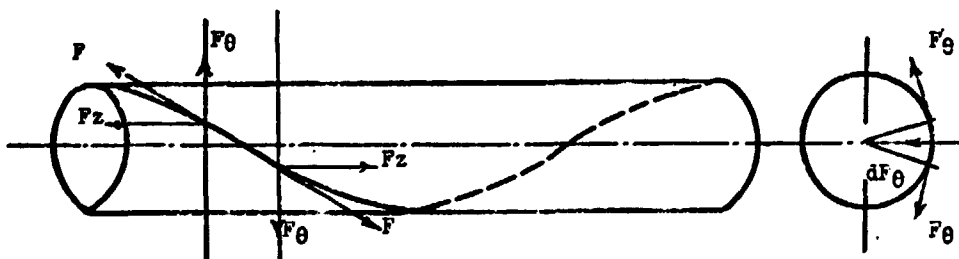


Figure 1.

Dans une section droite du système gaine-aiguille, la tension F du fil peut se décomposer en deux forces F_z et F_θ .

L'équilibre d'une tranche mince d'épaisseur dz de la gaine montre que celle-ci est soumise :

- à une compression moyenne due à F_z qui provoque un raccourcissement et un flambage de la gaine ;
- à un basculement des plans dû au couple de F_z par rapport à l'axe de la tranche ;
- à une torsion due au couple F_θ par rapport à l'axe.
- à une flexion et un écrasement dus à la résultante centripète dF_θ correspondant à la rotation de la force tangentielle.

L'aiguille prend alors une allure schématisée sur la figure 2.

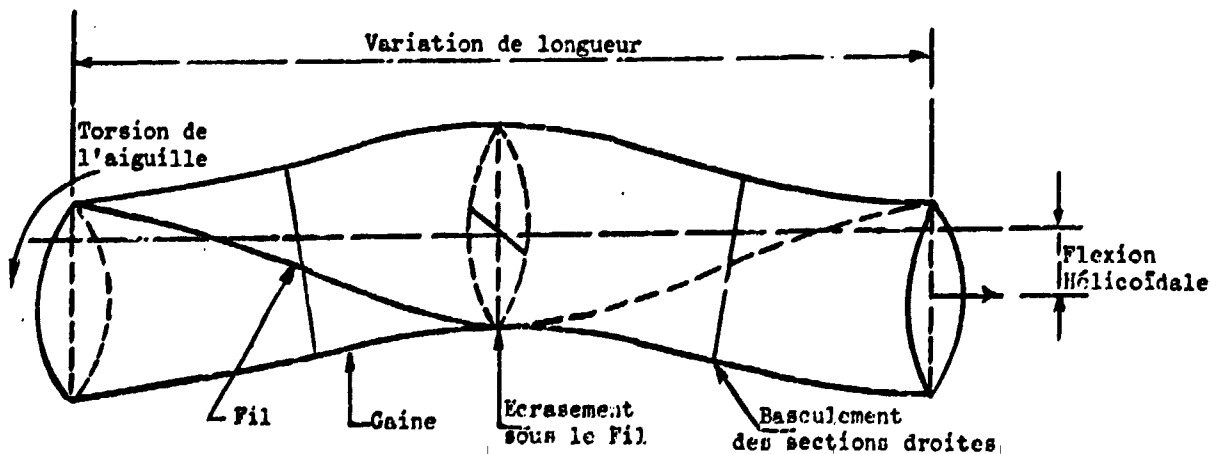


Figure 2.

La formalisation de cette interaction constitue un problème de mécanique statique relativement complexe en raison des variations de déformation de l'aiguille et du fil le long de la colonne fissile. Nous le résoudrons, dans le cas d'une aiguille isolée, moyennant un certain nombre de simplifications.

II. SIMPLIFICATION DU PROBLEME

II.1 Séparation des niveaux

Lorsqu'il existe un gonflement différentiel aiguille-fil fonction de la cote, l'état de contrainte à un niveau donné dépend de l'ensemble du comportement à tous les niveaux. Cependant, tant en raison de l'existence du frottement entre fil et gaine (un coefficient de frottement de 0,2 réduit la tension du fil de 70% sur un pas) que de l'action des aiguilles voisines et des faibles amplitudes de variation du gonflement au plan médian, on peut en fait considérer que le comportement à un niveau donné ne dépend que des conditions existantes à ce niveau ; en d'autres termes, il n'y a pas de glissement relatif fil-aiguille.

II.2 Elimination du régime élastique

Si l'on considère un matériau de module d'YOUNG E travaillant en-deça de sa limite élastique soumis à une contrainte initiale σ_0 et à une déformation additionnelle imposée $G(t)$, ce matériau, placé dans un flux neutronique, se déformera plastiquement avec une vitesse $\dot{\epsilon} = A\delta\sigma$ (dans laquelle A est une fonction de la température caractéristique du matériau, δ le débit de dose, σ la contrainte) et si la vitesse de déformation \dot{G} est constante, on calcule que :

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/T_0} + E T_0 \dot{G} (1 - e^{-t/T_0}) \text{ avec } T_0 = 1/A\delta E$$

Cette formule montre que la contrainte initiale disparaît avec la période T_0 et est remplacée par une contrainte d'équilibre $\dot{G}/A\delta$

Dans les conditions d'un réacteur rapide de puissance, la période T_0 est voisine de 10 jours et la contrainte d'équilibre correspondant à un allongement imposé du fil de quelques % au cours de la vie de l'aiguille reste inférieure à 10^8 Pa. Nous considérerons donc que le système fil-aiguille reste dans le domaine élastique et traiterons le problème en plastique, la constante de temps de relaxation des contraintes due au fluage d'irradiation étant très faible devant la durée de vie en pile des aiguilles.

II.3 Elimination du combustible

Le combustible est, dans les zones froides, constitué par un chapelet de pastilles indépendantes ; dans les zones chaudes il flue beaucoup plus rapidement que la gaine.

Nous étudierons donc le comportement mécanique de l'aiguille indépendamment de son combustible.

III. EVOLUTION GEOMETRIQUE DES AIGUILLES EN FONCTION DE LA TENSION DU FIL

III.1 Méthode utilisée

Le problème qui se pose à nous peut se résoudre par différentes méthodes. Nous présenterons ici non la plus rigoureuse mais celle qui nous semble tout à la fois la plus simple et la plus parlante. Elle revient à négliger la torsion de l'aiguille, ce qui est tout à fait licite en pratique et à ne raisonner que sur l'équilibre d'une section droite sous l'action des forces axiales.

III.2 Contraintes axiales dans la gaine

De par sa tension, le fil exerce sur la gaine une force centripète qui, la gaine fluant, conduit à une flexion hélicoïdale de celle-ci.

Plaçons-nous dans un cas déformé :

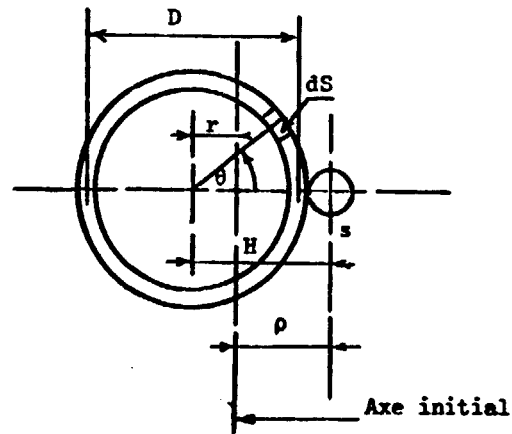


Figure 3.

Nous appellerons :

- S la section de la gaine
- s la section du fil
- r le rayon de flexion hélicoïdale de la gaine
- p le rayon d'enroulement du fil
- D le diamètre moyen gaine
- H l'entre-axe fil-gaine
- p le pas d'enroulement du fil
- l_f la longueur du fil sur un pas

Si F est la tension du fil, sa contrainte est $\sigma_f = \frac{F}{s}$

La composante axiale $F_z = F \frac{p}{l_f}$ de la tension du fil doit équilibrer les contraintes axiales dans la section droite de gaine.

En faisant l'hypothèse d'une répartition de contrainte plane dans la gaine, hypothèse justifiée par le fait que le pas d'enroulement du fil est grand devant le diamètre de l'aiguille, on en déduit les contraintes dans la gaine :

$$\sigma_g = \sigma_m \left(1 + \frac{4H}{D} \cos \theta \right) \text{ avec } \sigma_m = -\frac{s}{S} \frac{p}{l_f} \sigma_f$$

La contrainte axiale dans la gaine est comprise entre $\sigma_m \left(1 + \frac{4H}{D} \right)$ et $\sigma_m \left(1 - \frac{4H}{D} \right)$, ce qui montre que la gaine est en compression sous le fil, ce qui est normal, et en traction sur la fibre opposée.

III.3 Flexion de la gaine

La différence de contrainte $\frac{8H}{D} \sigma_m$ entre génératrices opposées de la gaine provoque un fluage différentiel qui se manifeste par une vitesse de courbure

$$\dot{C} = \frac{1}{D} A_g \delta \left(\frac{8H}{D} \sigma_m \right)$$

La courbure C étant liée au rayon de flexion par l'expression $C = \left(\frac{2\pi}{p} \right)^2 r$ on en déduit la vitesse de flexion

$$\dot{r} = \left(\frac{p}{2\pi} \right)^2 \frac{8H}{D^2} A_g \delta \frac{s}{S} \sigma_f \quad (1)$$

IV. EXPRESSION DU RAYON DE FLEXION DE L'AIGUILLE.

Si, maintenant, on exprime σ_f en fonction des déformations de la gaine et du fil on obtient :

$$\sigma_f = \frac{\dot{G}_g - \dot{G}_f}{\frac{A_f}{A_g} + \frac{S}{S} \left(1 + \frac{4H}{D}\right)} \times \frac{1}{A_g \delta} \quad (2)$$

d'où l'expression finale du rayon de flexion de la gaine en fonction des caractéristiques géométriques de l'aiguille et du fil, et des caractéristiques de comportement des matériaux constitutifs :

$$r = 2H \left(\frac{D}{\pi D}\right)^2 \frac{S}{S} \frac{\dot{G}_g - \dot{G}_f}{\frac{A_f}{A_g} + \frac{S}{S} \left(1 + \frac{4H}{D}\right)} \quad (3)$$

V. ECRASEMENT SOUS LE FIL

Il est la résultante des actions opposées dues d'une part au fil, d'autre part à la pression interne qui tend à arrondir la gaine dès que celle-ci est déformée. La valeur du premier terme résulte d'une démonstration classique en mécanique, dans le cas d'un tube cylindrique soumis à deux forces diamétralement opposées.

On peut montrer que le résultat reste valable pour un tube légèrement ovalisé et lorsqu'une force linéaire ψ est appliquée d'un seul côté d'un tronçon de tube si l'on compense cette force ψ par des forces de cisaillement homogènes dans la section du tube. Pour un tube où l'ovalisation O est définie comme la différence des deux diamètres principaux la force conduit à une variation d'ovalisation

$$\Delta O_1 = \frac{3}{8E} \left(\frac{D}{e}\right)^3 \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \psi$$

Le terme dû à la pression interne q , peut être également calculé en régime élastique. L'ovalisation globale s'écrit :

$$\Delta O = \frac{1}{2E} \left(\frac{D}{e}\right)^3 \left| \frac{3}{4} \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \psi - qO \right|$$

Cette équation est transposable dans le cas du fluage d'irradiation en :

$$\dot{O} = \frac{A_g \delta}{2} \left(\frac{D}{e}\right)^3 \left| \frac{3}{4} \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \psi - qO \right| \quad (4)$$

la force ψ à prendre en considération étant donnée par l'expression :

$$\psi = \left(\frac{2\pi}{p}\right)^2 (H-r) s \sigma_f \quad (5)$$

la contrainte σ_f étant donnée par l'expression (2) démontrée précédemment.

Les formules (4) et (5) montrent que l'écrasement de la gaine d'une aiguille libre est diminué non seulement par l'effet de la pression interne mais également par la mise en hélice de l'aiguille - terme en $(H-r)$ - qui, à tension du fil donnée, diminue la pression sur la gaine.

VI. VERIFICATION EXPERIMENTALE

Mise en hélice et écrasement des gaines ont été constatés sur différents assemblages en particulier certains dont les gaines se sont déformées plus que prévu. La figure 4 montre un lit d'aiguilles où l'on peut constater que les fils sont pratiquement redressés et la figure 5 une coupe de faisceau où l'on aperçoit très nettement les fils décollés du tube hexagonal.

VII. CONSEQUENCES POUR LE COMPORTEMENT DES FAISCEAUX

Cette mise en hélice, inévitable à partir du moment où l'on ne peut spécifier des gaines et fils ne gonflant absolument pas ou se déformant de la même façon à tous les niveaux de l'aiguille, donne à l'ensemble du faisceau un déplacement hélicoïdal à l'intérieur du tube hexagonal.

Ce déplacement perturbe l'hydraulique de l'assemblage en créant des by-pass entre aiguilles et tube hexagonal.

Ces by-pass qui n'interviennent que tous les 1/6 de pas sont relativement peu gênants.

Par contre, la mécanique du faisceau sera très modifiée par les phénomènes explicités ici.

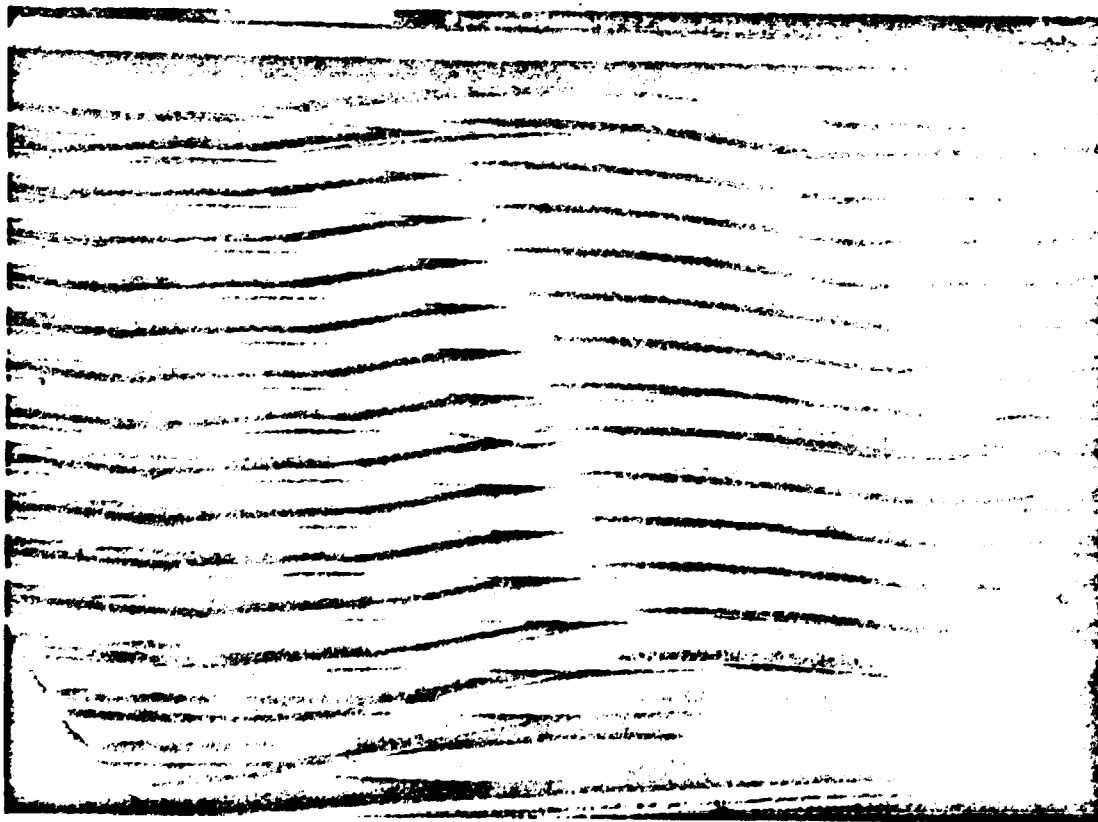


Figure 4.

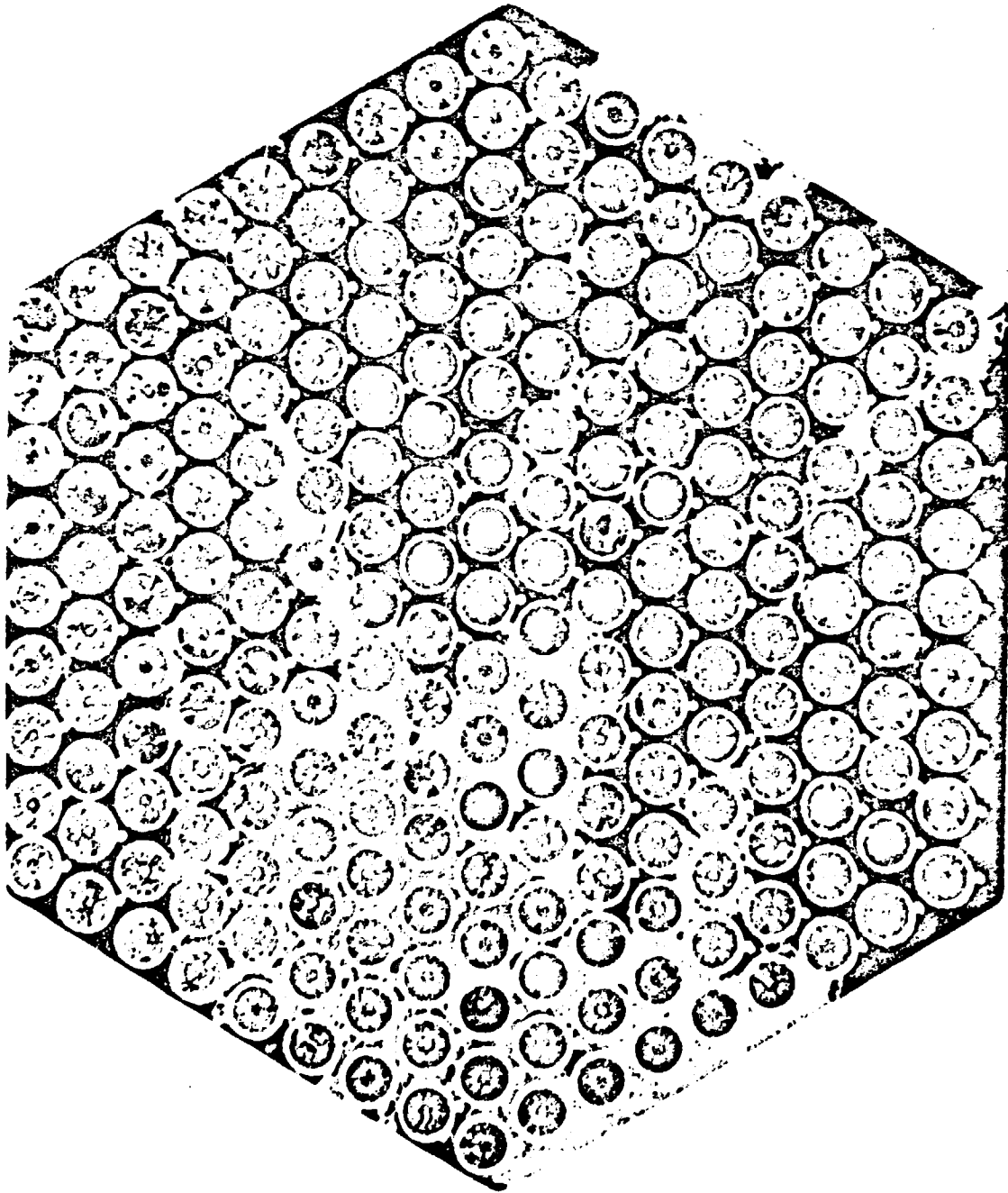


Figure 5.

