

Analyse micromécanique des gaines de combustible en situations accidentelles RIA

Modélisation, simulation et prédiction de la fissuration dynamique de la gaine

 André JAUBERT, Yann MONERIE, Céline PELISSOU, Frédéric PERALES
 IRSN, DPAM & Laboratoire MIST, IRSN-CNRS

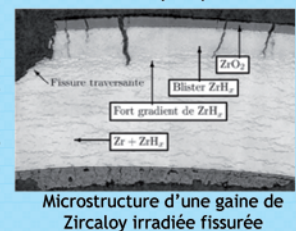
Contexte et Objectifs



Le RIA est un accident de dimensionnement pour lequel on postule une défaillance du système de contrôle limitant la réaction neutronique du cœur. Durant cet accident, la **température du combustible s'élève fortement**, entraînant une importante dilatation de ce dernier et une **augmentation de la pression des gaz de fission** qu'il contient ; ces deux mécanismes contribuent à accroître le chargement de la gaine de combustible, qui peut alors rompre. Comprendre et modéliser cette éventuelle rupture de gaine, dès la plus petite échelle, est un enjeu pour la prédiction de l'intégrité des structures des réacteurs nucléaires.



Contexte : l'étude de la **tenue des gaines de combustible** (tubes minces élancés) en Zircaloy ; et plus particulièrement de leur **fissuration dynamique**. Durant leur vie en réacteur, ces gaines subissent d'importantes modifications de leur microstructure et passent progressivement d'un matériau monphasé métallique (le Zircaloy) à un **matériau à gradient de propriétés** considéré en chaque point comme un biphase à matrice métallique. Ce biphase présente une anisotropie de comportement mécanique liée d'une part à l'anisotropie élastoplastique initiale de la matrice métallique et d'autre part à la **forme et à la distribution des inclusions d'hydrures**.



Fissuration dynamique de la gaine

Modélisation multiéchelle

Comportement homogène équivalent du biphase

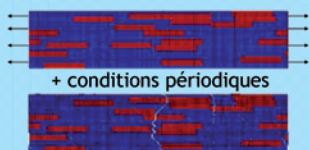
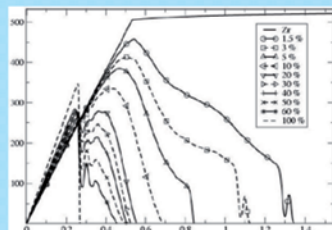
- Partie élastoplastique : **homogénéisation analytique**
- Partie fissuration : **homogénéisation numérique périodique (VER)**

Simulation numérique (logiciel XPER)

- Approche multicorps et multiéchelle
- Modèle de Zone Cohésive Frottante
- Approche Non Smooth Fracture Dynamics

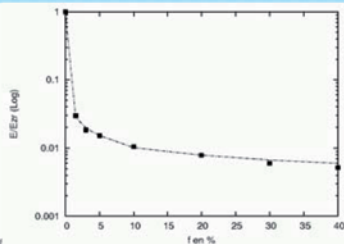
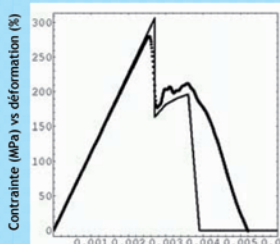
Composite de Comparaison Évolutif

Objectif : définir analytiquement les propriétés effectives des matériaux hétérogènes jusqu'à rupture en leur substituant des composites équivalents dont la morphologie et la composition varient en fonction du chargement macroscopique.

 Grandeur pertinente : **énergie de rupture**

 Contrainte (MPa) vs déformation (%)
pour différents taux d'inclusions


Mécanismes de déformation successifs

- Phase élastique : modèles linéaires (morphologie, distribution)
- Rupture des inclusions fragiles : critère en déformation
- Phase de recharge élastoplastique durcissante, hypothèse d'écrantage des contraintes dans les inclusions : modèle poro-plastique
- Phase adoucissante et rupture : modèle d'endommagement ductile

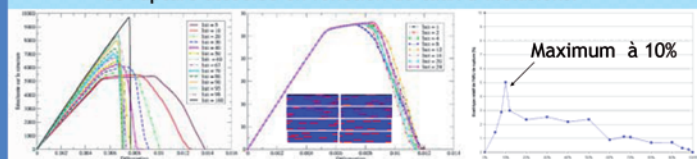


Volumes Élémentaires Représentatifs pour le comportement en fissuration

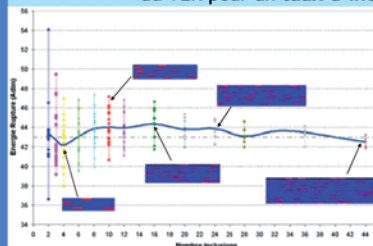
Objectif : définir les **caractéristiques essentielles** des VER (taille, distribution des inclusions, nombre de tirages, fraction volumique) à l'aide d'expériences numériques couplées à des approches statistiques et des techniques d'analyse d'images.

 Grandeur pertinente : **énergie de rupture**

- Etude 1 : évolutions de la réponse d'un VER donné et de l'énergie de rupture associée en fonction du taux d'inclusions.



- Etude 2 : évolution de l'énergie de rupture en fonction de la taille du VER pour un taux d'inclusions fixé à 10%.



Approche statistique

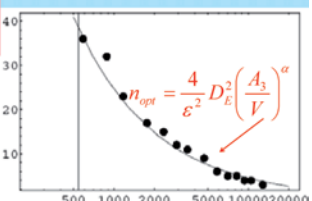
$$D_E^2 = f_v(1 - f_v)(E_{Zr} - E_{incl})^2$$

$$\frac{D_E^2(V)}{D_E^2} = \left(\frac{A_3}{V}\right)^\alpha$$

Résultats

- Micrographie => covariogramme
- Covariogramme => VER linéaire
- VER linéaire => VER fissuré

Micrographie => VER fissuré



A. Jaubert , Y. Monerie, C. Péliissou, F. Perales