

Études multi-échelles des gaines combustibles en conditions accidentelles

E. Pouillier, E. Bosso (EDF / R&D / MMC)

Contexte

Les accidents hypothétiques de classe IV Reactivity-Initiated Accident (RIA) et Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) sont pris comme référence pour le dimensionnement des réacteurs. Ainsi EDF R&D se doit d'établir et de valider les modèles de comportement thermo-mécaniques de la gaine combustible en alliage de zirconium pour assurer, dans le cadre de l'instruction des dossiers de sûreté, l'établissement de critères de rupture fiables ainsi que leur vérification. Lors de cette présentation des approches à différentes échelles sont présentées concernant l'identification et la validation de lois de comportement des gaines sous conditions accidentelles, ainsi que leur application.

Développement et identification d'une loi pour le RIA

Le RIA (Reactivity Initiated Accident) impose à la gaine des conditions de chargement thermo-mécaniques sévères. La température est de l'ordre de 300 à 600°C, la vitesse de déformation de 1 à 5 s⁻¹ et la biaxialité des contraintes comprise entre 0,5 et 1. Ainsi, les lois de comportement sont adaptées afin de satisfaire une telle gamme de chargement. Actuellement, les modèles considérés par EDF, pour les études de compréhension du RIA, intègrent une dépendance à la texture, l'irradiation, l'hydruration ou encore à l'oxydation de la gaine. La texture marquée des tôles et des gaines en alliages de zirconium se traduit par une forte anisotropie du comportement mécanique. Or, avec les modèles identifiés pour le RIA, il subsiste des difficultés pour reproduire précisément le comportement mécanique pour certains trajets de chargement. Cette étude a donc pour objectif de proposer un modèle décrivant

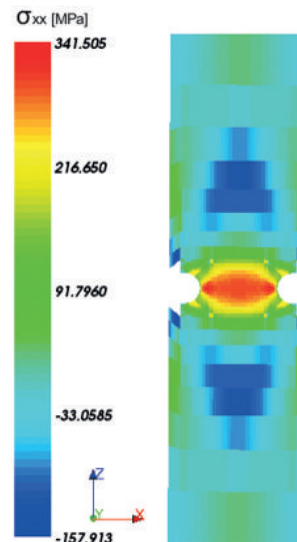


Figure 1

de façon complète le comportement anisotrope d'une tôle de Zircaloy-4 recristallisé et valide en condition RIA.

La loi viscoplastique purement cinématique "Delobelle-Robinet-Schäffler" simplifiée, accessible via la bibliothèque de lois Zmat couplée à Code_Aster, est identifiée. La calibration des paramètres du modèle est réalisée à partir de calculs «point matériel» pour des chargements conventionnels de traction et de cisaillement cyclique réalisés sur tôle

suivant cinq directions de sollicitation différentes. Des essais biaxiés sur tubes (en accord avec la géométrie de la gaine) de traction/torsion et traction/pression ont également été pris en compte pour l'identification des paramètres dépendants de plusieurs chargements sur tôle. D'autre part, la validation a été réalisée sur des calculs de structure (éprouvettes plates entaillées (Figure 1), Punch test). L'évolution du comportement en fonction des directions de chargement et du niveau de biaxialité dans la gamme de température et de vitesse de sollicitation du RIA ont pu être bien reproduit grâce aux trois matrices d'anisotropie caractéristiques du modèle utilisé.

Bien que la loi macroscopique soit en adéquation avec les attentes industrielles d'un code peu consommateur de temps de calcul, le manque de physique et le grand nombre de paramètres mis en jeu reste un frein dans cette étude.

Études multi-échelles des gaines combustibles en conditions accidentelles

E. Pouillier, E. Bosso (EDF / R&D / MMC)

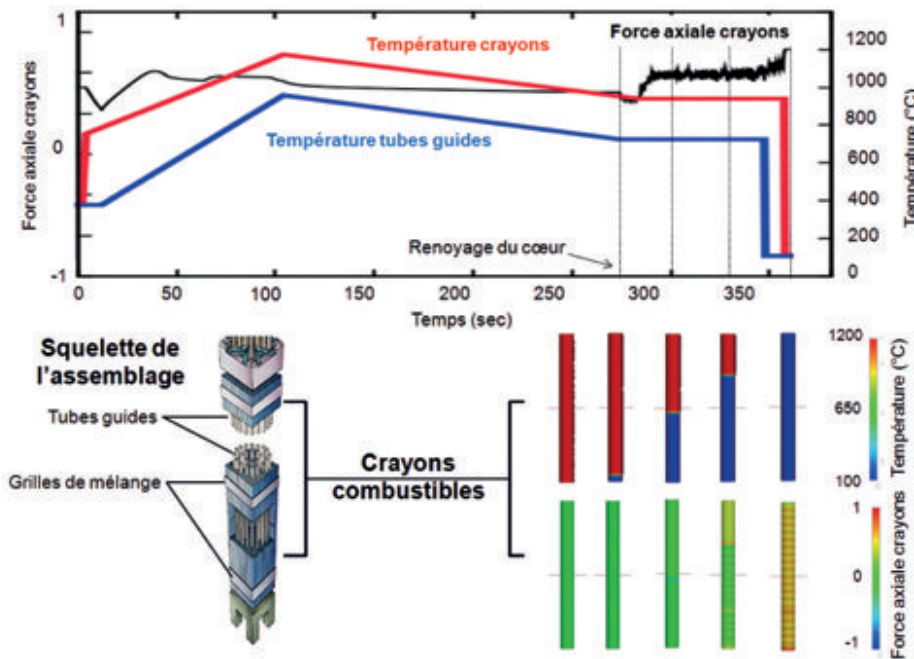


Figure 2 : Évolution de la force axiale dans les crayons combustibles en fonction de la température crayons et tubes guides

Ainsi, une première identification selon une approche en champs moyen (modèle de Berveiller-Zaoui) et considérant la loi cristalline "Cailletaud-Méric" appliquée à la maille HCP (caractéristique du zirconium) sera présentée. L'anisotropie est alors prise en compte au travers de l'orientation des grains et de l'utilisation de paramètres spécifiques pour chaque système de glissement. Une telle approche liant le comportement mécanique à la microstructure permet également une transférabilité à d'autres textures cristallographiques.

Application d'une loi APRP sur un calcul de structure soumis à des chargements thermo-mécaniques complexes

Dans le cadre de la rénovation du référentiel APRP, il a été demandé à EDF d'analyser de manière réaliste l'ensemble des chargements mécaniques additionnels susceptibles d'intervenir sur la gaine pendant la trempe (Figure 2).

Le calcul du blocage hypothétique du crayon dans l'assemblage combustible au cours d'un APRP mis en place pour cette analyse, a été choisi pour illustrer ici l'application des lois de comportement des gaines sous conditions accidentelles pour la mise en œuvre de calculs de structure.

Afin de prendre en compte au mieux les sollicitations subies par la structure de l'assemblage combustible, ces calculs sont pilotés par les cinétiques de chargements thermiques issues des études de dimensionnement qui fournissent les évolutions des paramètres thermo-hydrauliques tels que l'évolution du front de trempe et de la température maximale de la gaine.

De plus, grâce aux études amont menées à EDF R&D, le comportement mécanique respectif de chacune des phases métallurgiques du matériau de gainage a été intégré à l'aide d'une loi de Lemaitre sans seuil, avec prise en compte de l'anisotropie de la phase alpha Zr.

Ainsi, Les calculs réalisés avec Code_Aster ont permis de modéliser différents cas de blocage des crayons sur une longueur équivalente à l'espace entre deux grilles de mélange de l'assemblage combustible. A titre conservatif le blocage du crayon est considéré comme un encastrement total et instantané des crayons dans les grilles de mélange. Ce type de modélisation rend ainsi possible une évaluation fine des champs mécaniques résultant de sollicitations en conditions accidentelles hypothétiques. Par ailleurs, la bonne cohérence des résultats avec la bibliographie sur le sujet démontre la robustesse de ce type d'approche.