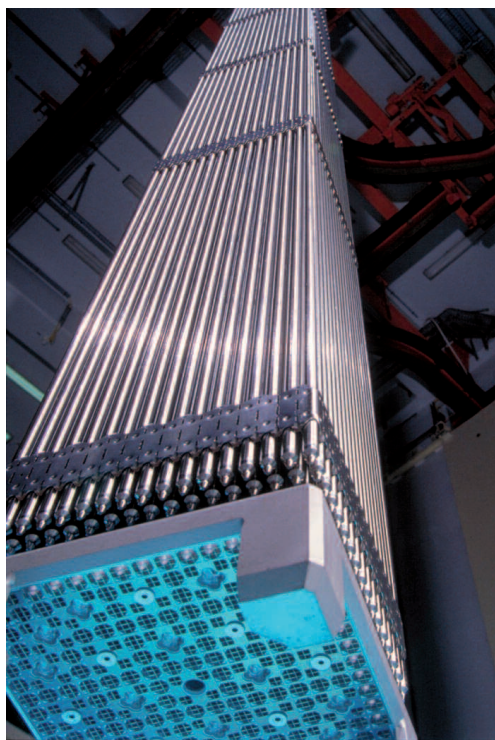


4.1

Comportement thermomécanique de la gaine du combustible



Un assemblage combustible de réacteur à eau sous pression.

Afin d'évaluer le comportement des réacteurs nucléaires en situation accidentelle, des accidents-type (encore appelés accidents de référence) ont été définis. Pour ces scénarios d'accident, le comportement du réacteur doit être vérifié.

Parmi les accidents de référence définis, on trouve l'accident de réactivité, encore appelé RIA (*Reactivity Initiated Accident*). L'accident de référence résulte de la défaillance d'un mécanisme de pilotage d'une grappe de commande formée de crayons absorbants qui assurent la régulation de la réaction nucléaire. Cette défaillance consiste en « l'éjection » de la grappe de commande sous l'effet de la différence de pression, de l'ordre de 150 bar, entre le circuit primaire et l'enceinte de confinement. Cette éjection violente entraîne un emballement local de la réaction nucléaire très rapide (quelques dizaines de millisecondes), qui reste cependant limité grâce en particulier à l'effet Doppler (l'augmentation de température du combustible fait chuter la puissance neutronique dissipée localement).

Le combustible nucléaire utilisé dans les réacteurs à eau sous pression est contenu dans des assemblages de

264 crayons de combustible en réseau carré (*photo ci-contre*). Les crayons combustibles, d'une longueur de l'ordre de 4 m, sont eux-mêmes constitués d'un empilement de pastilles (cylindres d'oxyde d'uranium ou d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium d'environ 0,8 cm de diamètre et 1 cm de hauteur) placées au sein d'une gaine en alliage à base de zirconium. Cette gaine constitue la première barrière vis-à-vis du risque de dissémination des produits radioactifs présents dans le combustible.

Lors de leur séjour en réacteur, les gaines des crayons combustibles sont oxydées par l'eau du circuit primaire. Cette réaction ($\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 4\text{H}$) libère de l'hydrogène dont une partie se diffuse dans les gaines. Comme pour les autres métaux, l'hydrogène a un effet fragilisant sur l'alliage de zirconium dont sont constituées les gaines.

Par ailleurs, les fissions qui se produisent au sein des pastilles de combustibles engendrent la formation de gaz de fission (krypton et xénon), qui donnent lieu, lorsque leur concentration augmente, à la formation de bulles intragranulaires et de bulles intergranulaires ainsi qu'au remplissage par ces gaz des porosités préexistantes (*figure 1*).

L'accident de réactivité se traduit par une importante et rapide production d'énergie au sein du combustible. Dans ces conditions, la gaine du crayon combustible peut être soumise d'une part à un chargement par interaction mécanique pastille-gaine du fait de la dilatation thermique différentielle de la colonne fissile et de la gaine et du fait du gonflement induit par les gaz de fission, d'autre part à un chargement en pression interne correspondant aux relâchements de gaz de fission dans les volumes libres du crayon.

L'étude de l'accident de réactivité consiste alors à répondre aux questions suivantes :

- Y a-t-il rupture des gaines des crayons combustibles ?
- Si oui, y a-t-il éjection de fragments de combustibles dans le réfrigérant ?
- Si oui, l'interaction thermique qui en résulte risque-t-elle de propager l'accident aux crayons voisins ou de mettre en danger l'intégrité du circuit primaire du réacteur ?

Pour apporter des réponses à ces questions, qui traitent de problèmes que l'on ne peut pas simuler sur un réacteur, il est nécessaire de développer des logiciels qui modélisent au mieux les phénomènes et permettent de transposer les résultats des essais de validation aux conditions attendues pour les réacteurs. C'est le cas du logiciel SCANAIR qui a pour objet la prévision du comportement thermomécanique des crayons combustibles en RIA et l'évaluation de leur risque de rupture.

Le logiciel SCANAIR

Le logiciel SCANAIR [1] est structuré en trois modules qui modélisent respectivement les comportements thermique et mécanique des matériaux en présence et l'effet des gaz de fission. Comme illustré sur la **figure 2**, une des particularités du comportement des crayons

combustibles en cas de RIA est le couplage existant entre ces trois modules qui nécessite de réaliser des itérations entre eux jusqu'à convergence vers la solution du problème.

La faiblesse des gradients axiaux des sollicitations (et *a posteriori* des

champs solutions des équations d'équilibre) permet de considérer le crayon comme un assemblage cylindrique en déformations planes. Cependant, le crayon n'étant pas une structure infinie, on est conduit à faire le choix de conditions aux limites axiales. L'assemblage est fractionné en plusieurs tranches. Dans chacune d'elles, on fait l'hypothèse de conditions axisymétriques en déformations planes généralisées (pas de dépendance des variables avec l'azimut et déplacement azimutal nul).

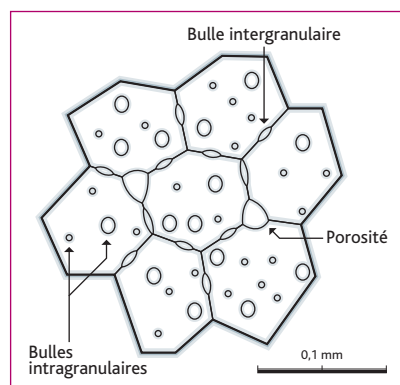


Figure 1 : Coupe transversale schématisée d'un crayon combustible montrant bulles de gaz et porosité.

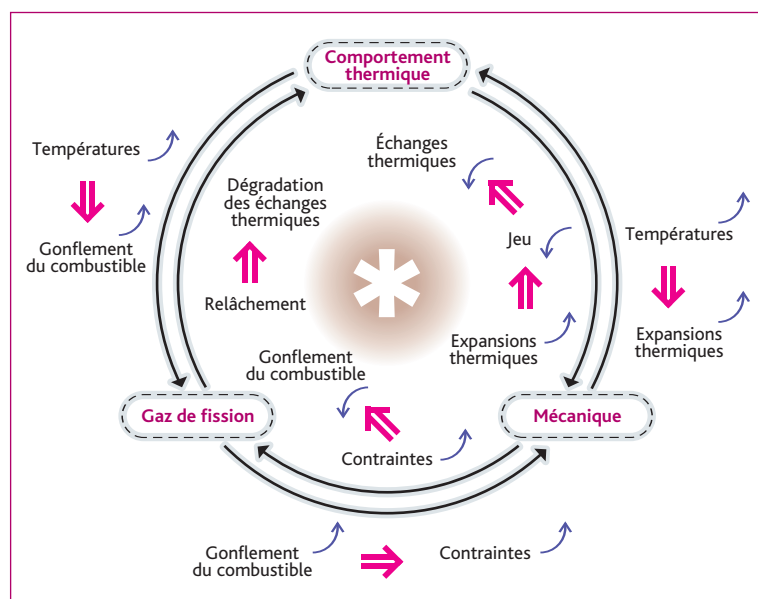


Figure 2 : Architecture logique du logiciel SCANAIR.

Les équations d'équilibre sont résolues dans chaque tranche axiale dans le plan (r, θ) à l'aide d'une discrétisation spatiale de type méthode aux éléments finis. Les tranches sont ensuite « empilées » en série, en respectant la continuité des efforts.

La durée caractéristique de l'accident étudié étant de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes, les sollicitations mécaniques de la gaine sont très rapides, avec des vitesses de déformation typiques de l'ordre de 1 s^{-1} . De plus, le transfert vers la gaine de l'énergie déposée par l'accident dans les pastilles de combustible entraîne des sollicitations thermiques sur la gaine qui peuvent être fortes. La température de la gaine pourrait atteindre plusieurs centaines de degrés Celsius en cas d'ébullition de l'eau entourant le crayon suivie d'un assèchement de la paroi. Enfin, le comportement thermomécanique de la gaine dépend d'éventuels effets de l'irradiation sur les caractéristiques mécaniques des alliages de zirconium utilisés, matériaux par ailleurs mal connus car très peu utilisés dans l'industrie.

L'ensemble de ces considérations a conduit à concevoir et réaliser un vaste programme de caractérisation mécanique des matériaux de gainage, le programme PROMETRA [2]. L'interprétation des essais de ce programme a permis d'établir des lois de comportement (fonctions de la température et de la vitesse de sollicitation) qui ont été introduites dans SCANAIR. La *figure 3*, qui présente l'évolution en fonction de la température et pour deux vitesses de sollicitation de la contrainte maximale (UTS) et de l'allongement à la rupture (TE) illustre l'utilisation dans le logiciel SCANAIR des résultats du programme PROMETRA.

Compte tenu de l'ensemble des simplifications retenues pour l'élaboration du logiciel SCANAIR, il apparaît essentiel de le qualifier par rapport à une référence expérimentale aussi proche que possible des situations à

étudier pour les réacteurs. Cette qualification a été menée en utilisant les résultats du programme expérimental CABRI REP-Na [3]. Ce programme, mené dans le réacteur expérimental CABRI de 1993 à 2001, consistait à soumettre des tronçons de crayons irradiés dans des réacteurs électronucléaires à des transitoires rapides de puissance délivrés par le cœur du réacteur CABRI. L'ensemble des caractéristiques retenues pour les essais était représentatif des conditions accidentelles en réacteur, à l'exception de la nature du réfrigérant qui, dans le cas des essais, était du sodium liquide et non de l'eau comme dans les REP. Cette caractéristique réduit de fait la représentativité des essais à la phase initiale du transitoire pour laquelle les échanges de chaleur avec le réfrigérant restent limités, la conductivité thermique du sodium et sa température d'ébullition étant différentes de celles de l'eau.

La qualification de SCANAIR par rapport aux résultats du programme CABRI REP-Na a permis, malgré ces restrictions, de tirer des conclusions importantes.

- Le module de thermique permet de calculer de manière satisfaisante les températures mesurées dans le sodium.
- La déformation circonférentielle résiduelle est généralement bien estimée. Cependant, dans le cas d'essais avec très forte injection d'énergie (tels que REP-Na2), la valeur calculée surestime largement la valeur mesurée (*figure 4*). Les évaluations conduites montrent qu'il conviendrait de modéliser de manière plus fine le comportement du combustible aux fortes températures, en particulier en prenant en compte le fluage.

La mise en place (en cours) d'une boucle d'essais à eau sous pression dans le réacteur CABRI et la réalisation du programme expérimental associé dans un cadre international permettra de fournir de nouvelles données expérimentales plus représentatives afin d'apprécier le compor-

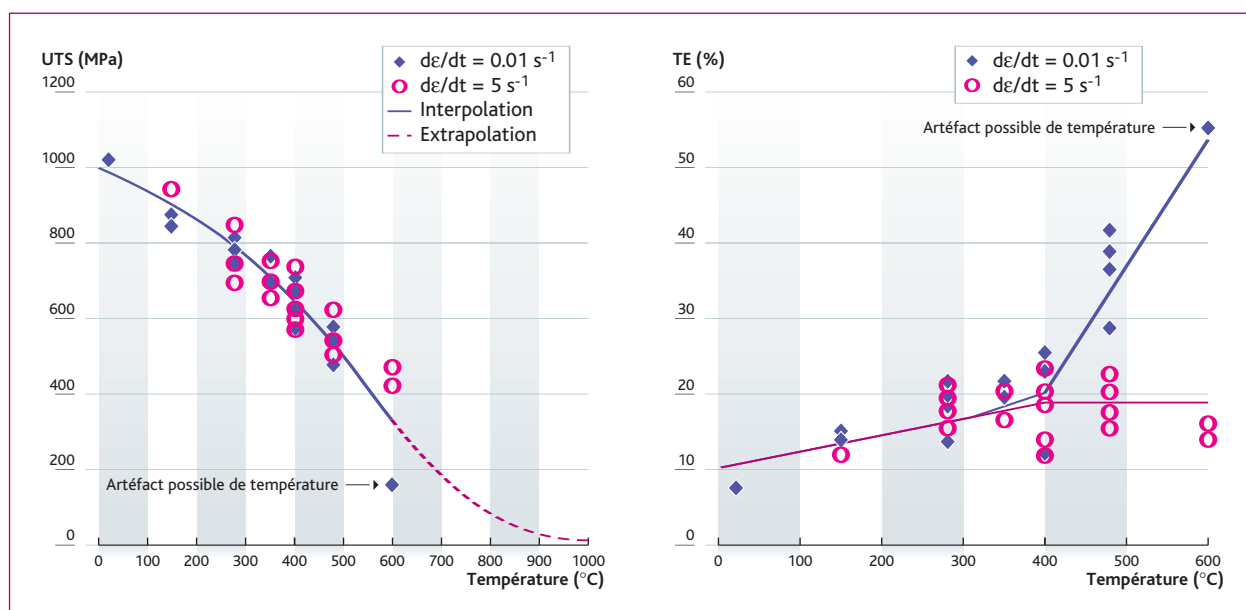


Figure 3 : L'évolution en fonction de la température et pour deux vitesses de sollicitation de la contrainte maximale (UTS) et de l'allongement à la rupture (TE).

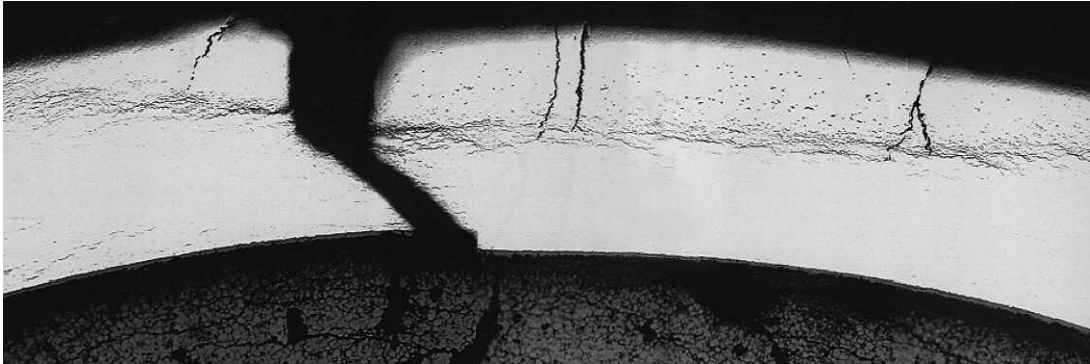


Figure 5 : Aspect micrographique d'une rupture de gaine obtenue lors d'un essai RIA.

tement des combustibles et d'étendre la validation de SCANAIR à l'ensemble des phases de l'accident, y compris pour des situations qui conduiraient à l'apparition de la crise d'ébullition dans le canal d'essai.

Application de la mécanique de la rupture

Comme indiqué en début d'article, une des questions posées est l'éventuelle rupture des gaines de crayons lors d'un transitoire de puissance de type RIA.

L'examen des résultats des essais du programme CABRI ainsi que de ceux d'autres programmes réalisés à l'étranger (en particulier les essais réalisés par l'institut JAERI dans le réacteur expérimental NSRR au Japon) montre que les ruptures de gaines lors d'essais RIA sont associées à de

faibles déformations résiduelles, comme celle qui est présentée sur la **figure 5**. Il est connu par ailleurs que l'hydrogène produit lors de la réaction d'oxydation de la gaine en réacteur a un effet fragilisant sur les métaux. D'où le développement d'une approche pragmatique consistant à appliquer au problème de la rupture des gaines les méthodes classiques de la mécanique de la rupture élastoplastique. Ces méthodes sont bien établies et sont accompagnées d'outils qualifiés de mise en œuvre.

Un ensemble de calculs par éléments finis à l'aide du logiciel CAST3M a été réalisé dans un premier temps. L'objet de ces calculs était d'évaluer, pour différentes températures et différentes tailles de fissures initiales, l'intégrale de Rice J – qui est un paramètre caractérisant l'intensité du chargement du point de vue de la structure fissurée – en fonction de la déformation circonférentielle de la gaine.

Par ailleurs, il est nécessaire de disposer de la valeur critique de l'intégrale de Rice (valeur pour laquelle la fissure se propage) pour apprécier la résistance du matériau à la fissuration. Cette valeur peut être reliée à la valeur de la ténacité, paramètre habituellement mesuré dans les essais de caractérisation mécanique. Une étude bibliographique a été réalisée. Elle a permis d'établir une expression analytique de la ténacité en fonction de la concentration moyenne en hydrogène dans le matériau et de la température. Les valeurs de ténacité obtenues par cette expression sont tracées sur la **figure 6 (page 8)** et sont comparées aux résultats expérimentaux. Comme attendu, on constate un fort effet de la concentration en hydrogène sur la ténacité. Le matériau de gainage semble par ailleurs avoir une température de transition peu marquée, en particulier pour les faibles teneurs en hydrogène. On peut aussi noter l'absence de résultats expérimentaux au-delà de 400 °C, ce qui introduit un degré d'incertitude dans les prédictions à haute température.

Il est nécessaire de connaître la taille initiale des défauts pour évaluer le risque de rupture. Une analyse des résultats d'un ensemble d'essais du programme de surveillance d'EDF a donc été réalisée dans ce but. Elle a permis de relier l'épaisseur de la couche d'oxyde (zircone) à la taille des défauts existant dans la gaine. Cette relation a été construite de manière probabiliste. En effet, plusieurs gaines ayant une même épaisseur d'oxyde peuvent avoir des résistances mécaniques différentes : il est alors naturel

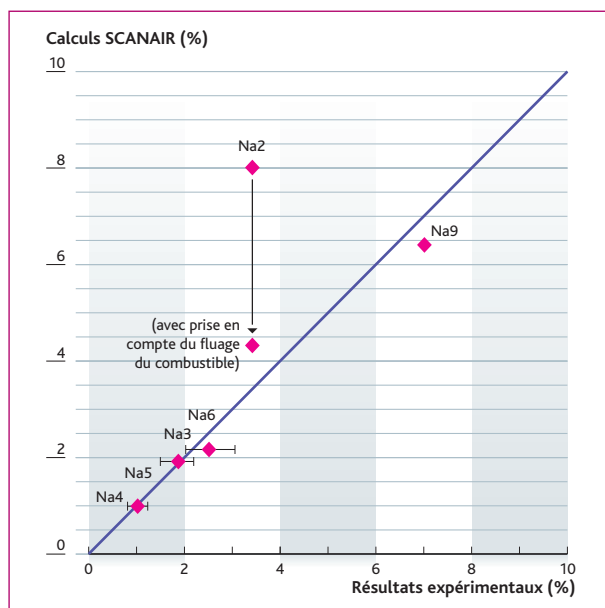


Figure 4 : Déformation circonférentielle (programme REP-Na), comparaison, mesure/calcul.

d'exprimer le modèle en termes de probabilité de présence d'un défaut de taille donnée, en fonction de l'épaisseur de zircone.

Un modèle probabiliste du risque de rupture, établi en combinant l'ensemble de ces éléments a été introduit dans SCANAIR. Le faible coût de ce modèle en termes de temps de calcul permet une utilisation aisée, une fois la base de données d'intégrales de Rice établie, dans les études de définition d'essais ou les études d'application à l'échelle d'un réacteur de puissance.

Il convient de noter cependant deux types de limitation de l'application de la mécanique de la rupture à notre cas. D'une part, la mécanique de la rupture n'est pas applicable en toute rigueur pour des structures aussi minces (typiquement 570 μm). D'autre part, l'étroitesse des bases de données de ténacité et de probabilité de taille initiale des défauts peut dans certains cas rendre les applications problématiques.

Nouvelles approches

Compte tenu des limitations inhérentes à l'application de l'approche classique de la mécanique de la rupture, il est apparu souhaitable de développer de nouvelles approches de modélisation. Pour pallier les limitations précédentes, il semble nécessaire de modéliser le comportement de la gaine à une échelle permettant de représenter les structures qui la composent. La taille caractéristique est fixée dans le cas présent par l'épaisseur des plaquettes d'hydrures de zirconium (forme sous laquelle précipite l'hydrogène qui a diffusé dans la gaine).

La structure à étudier étant divisée en cellules élémentaires, il faut établir les lois de comportement qu'il convient d'associer à chacune de ces cellules (figure 7).

Les méthodes de l'homogénéisation ont été employées pour déterminer le comportement volumique courant du matériau (sans fissuration). Un des avantages de cette approche est qu'elle se situe dans un cadre théorique bien établi. Des développements analytiques peuvent alors être poussés très avant, ce qui garantit une bonne prise en compte de l'influence des paramètres du problème. De tels développements ont été réalisés en collaboration avec le Laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille pour mettre au point un modèle de comportement élastoplastique anisotrope du zircaloy hydruré [4].

La méthode des zones cohésives a été retenue pour déterminer le comportement surfacique, c'est-à-dire pour représenter le comportement en fissuration. Il s'agit pour l'essentiel d'utiliser une loi de comportement qui relie la contrainte appliquée aux lèvres d'une fissure au saut de déplacement correspondant. Après une phase de croissance simultanée de la contrainte et du saut de déplacement $[u]$, la contrainte diminue alors que $[u]$ augmente, ce qui traduit la décohésion progressive de l'interface jusqu'au moment de sa rupture (figure 7). Cette loi de comportement est alors imposée aux interfaces entre les éléments du maillage, ce qui permet de calculer la propagation d'une fissure sans imposer son cheminement *a priori*. Cette méthode est particulièrement bien adaptée pour

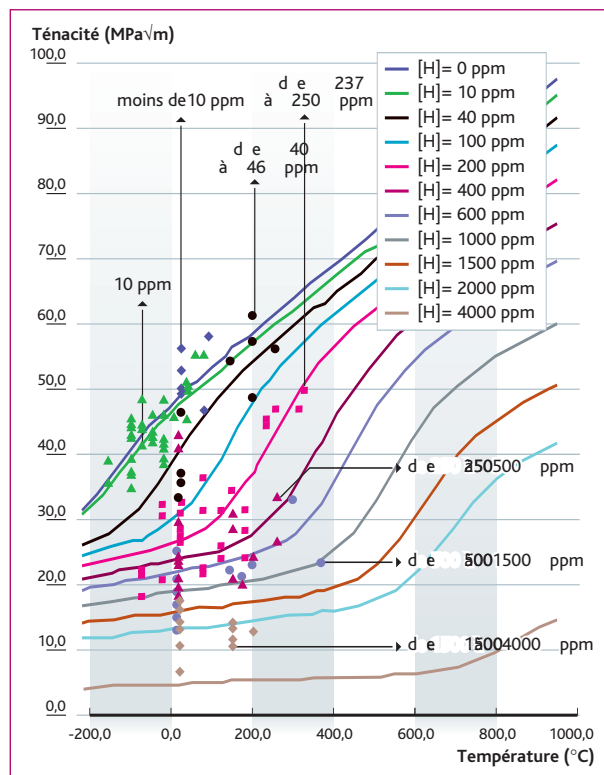


Figure 6 : Ténacité pour différents teneurs du métal en hydrogène.

la fissuration en dynamique. Des développements réalisés dans le cadre d'une thèse, cofinancée par IRSN et EDF, ont consisté à mettre au point un modèle de zone cohésive avec contact frottant permettant d'aborder les problèmes de propagation de fissure en mode mixte [5]. La figure 8 illustre une application de cette méthode sur l'exemple d'un tronçon de gaine présentant une concentration d'hydrures croissante du bas vers le haut. Les couleurs représentent les isovaleurs de la déformation plastique équivalente cumulée.

Les méthodes développées ici permettent de dépasser les limitations des approches classiques comme la mécanique de la rupture. Leur application dans la gamme de paramètres représentative des RIA devrait permettre d'établir et de justifier des lois macroscopiques qui seront *in fine* introduites dans le logiciel SCANAIR.

Il est néanmoins crucial pour parvenir à cet objectif d'établir les « bonnes » lois de comportement à utiliser dans les modèles à l'échelle microscopique, comme celles à retenir pour les zones cohésives aux interfaces zircaloy/zircaloy, zircaloy/hydrure et hydrure/hydrure. Il est pour cela nécessaire de disposer de données expérimentales pertinentes. Une collaboration a été engagée en ce sens avec le Laboratoire de mécanique et de génie civil de Montpellier où il est prévu d'utiliser des techniques expérimentales novatrices comme l'intercorrélation d'images de granularité [6] afin de caractériser le comportement mécanique des matériaux à petite échelle.

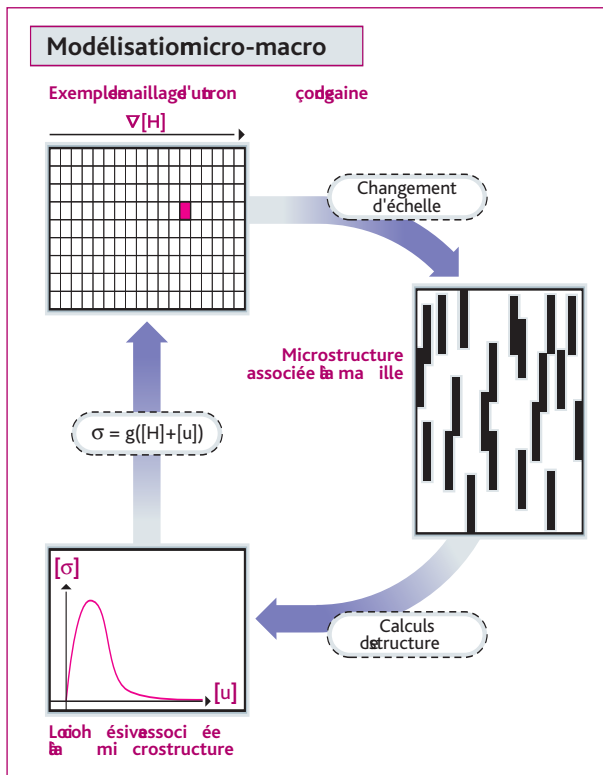


Figure 7 : Modélisation microstructurale.

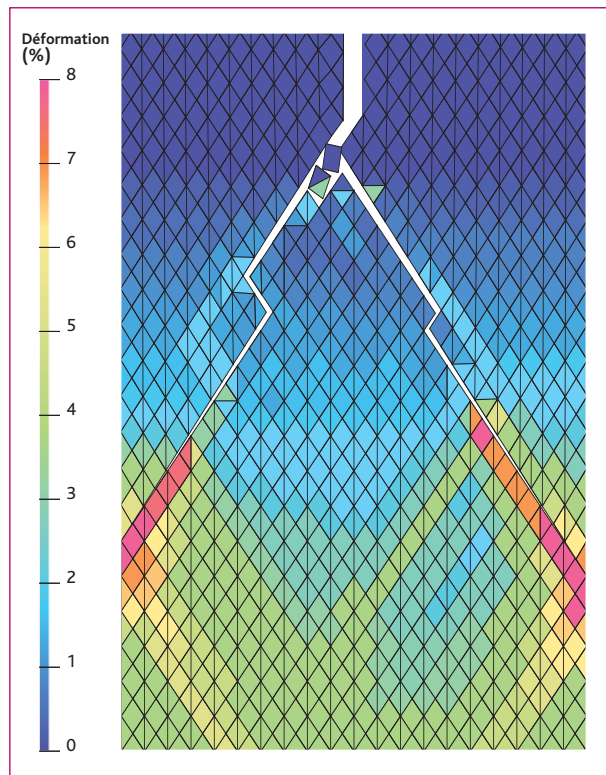


Figure 8 : Propagation d'une fissure en mode I d'une gaine présentant un gradient de concentration en hydrures.

Conclusion

L'étude du comportement thermomécanique de la gaine en RIA, en particulier la prédiction de son éventuelle rupture, présente des difficultés liées notamment à la nature non homogène du matériau qui la compose (hydrures dans une matrice métallique, gradients de concentration en hydrures) et à ses dimensions caractéristiques allant du plus petit (épaisseur 0,57 mm) au plus grand (longueur ~ 4 m). Au-delà de la première approche, qui consiste à appli-

quer les méthodes classiques de la mécanique des structures, est apparu le besoin de développer des approches nouvelles à plus petite échelle afin de progresser dans l'étude. L'application de ces méthodes dans la gamme de paramètres représentative des RIA permettra d'établir et de justifier des lois macroscopiques qui seront *in fine* introduites dans le logiciel SCANAIR.

Références

- [1] E. Federici, F. Lamare, V. Bessiron, J. Papin. The SCANAIR code version 3.2: main features and status of qualification, IAEA TCM on fuel behaviour under transient and LOCA conditions, Halden, Norway, 10-14 September 2001, IAEA-TECDOC-1320, pp. 88-101.
- [2] J. Desquines, B. Cazalis, C. Bernaudat, C. Poussard, X. Averty, P. Yvon. Mechanical properties of zircaloy-4 PWR fuel cladding with burnup 54-64 MWd/kgU and implications for RIA behavior, J. of ASTM Int., vol. 2, issue 6, June 2005.
- [3] J. Papin, B. Cazalis, J.-M. Frizonnet, E. Federici, F. Lemoine. Synthesis of CABRI-RIA tests interpretation, Eurosafe 2003, Paris, France 25-26 November 2003, disponible en ligne sur www.irsn.org.
- [4] P.-G. Vincent, Y. Monerie, S. Bourgeois. Homogénéisation du comportement élastoplastique des gainages de crayons combustibles, XVII^e Congrès français de mécanique, Troyes, 29 août - 2 septembre 2005.
- [5] F. Perales, Y. Monerie, F. Dubois, L. Stainier. Numerical simulation of dynamical fracture in heterogeneous materials, Third M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Cambridge, MA, USA, June 14-17, 2005.
- [6] B. Watrisse, A. Chrysochoos, J.M. Muracciole, M. Némotz-Gaillard. Kinematic manifestations of localisation phenomena in steels by digital image correlation, Eur. J. of Mech. - A/Solids, vol. 20, issue 2, pp. 189-211, March 2001.