

## Développement d'un essai thermomécanique permettant d'étudier le comportement de gaine en alliage de zirconium en conditions représentatives de la phase PCMI lors d'un RIA

A. ZOUARI<sup>1,2</sup>, M. BONO<sup>1</sup>, D. LE BOULCH<sup>1</sup>, T. LE JOLU<sup>1</sup>, J. BESSON<sup>2</sup>, J. CREPIN<sup>2</sup>

1. CEA Saclay/DEN/DANS/DMN/SEMI, 91191 Gif-sur-Yvette, France

[Ahmed.zouari@cea.fr](mailto:Ahmed.zouari@cea.fr), [Matthew.bono@cea.fr](mailto:Matthew.bono@cea.fr), [David.leboulch@cea.fr](mailto:David.leboulch@cea.fr), [Thomas.lejolu@cea.fr](mailto:Thomas.lejolu@cea.fr)

2. Mines ParisTech – PSL Université/Centre des matériaux 7633, 91003 Evry, France

[Jacques.besson@mines-paristech.fr](mailto:Jacques.besson@mines-paristech.fr), [Jerome.crepin@mines-paristech.fr](mailto:Jerome.crepin@mines-paristech.fr)

**Mot clé:** RIA, PCMI, EDC, Zy-4, gaine, Corrélation d'image, CAST3M

### Résumé

Des essais d'Expansion Due à la Compression (EDC) ont été réalisés afin de reproduire les conditions mécaniques pendant la première phase d'un transitoire de puissance dans un réacteur, également appelée phase d'interaction mécanique pastille-gaine. Les essais ont pour but de reproduire aussi proche que possible les modes de chargement et de rupture macroscopique observés lors des essais intégraux d'un accident d'injection de réactivité R.I.A réalisés sur des crayons de combustible. Deux types d'essais EDC avec différentes conditions de biaxialité des déformations ont été réalisés afin d'étudier l'évolution de la déformation circonférentielle à la rupture en fonction de la biaxialité des déformations. Les champs de déformation à la surface de l'éprouvette sont mesurés par stéréo-corrélation d'images. Les essais montrent que la déformation circonférentielle à la rupture a tendance à diminuer avec l'augmentation du taux de biaxialité des déformations. Des modélisations par éléments finis avec le code CAST3M des essais EDC ont été réalisées. Les déformations circonférentielle et axiale issues des simulations sont en accord avec celles mesurées expérimentalement.

### Introduction

Le cœur des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) des centrales nucléaires est constitué d'assemblages combustibles, dont la gaine en alliage de zirconium, première barrière de confinement du combustible, fait partie. L'accident hypothétique d'injection de réactivité, appelé RIA pour Reactivity Initiated Accident, consiste en une augmentation locale, brutale et incontrôlée de la puissance du réacteur. L'évaluation du comportement du réacteur nucléaire passe notamment par l'étude du comportement mécanique de la gaine dans cette situation accidentelle. L'augmentation brutale de la puissance injectée conduit à la dilatation quasiment instantanée des pastilles. Ceci engendre, durant la première phase de l'accident appelée PCMI (Pellet Cladding Mechanical Interaction) un chargement mécanique multiaxé sur la gaine caractérisé par un rapport de biaxialité des déformations  $\varepsilon_{zz}/\varepsilon_{\theta\theta}$  compris entre un état de déformation plane (aucune déformation axiale dans la gaine) et un état d'équibiaxialité (des efforts de traction égaux dans les directions axiale et circonférentielle) (1).

Le rapport de biaxialité des déformations peut avoir un effet important sur la déformation à la rupture d'un matériau. Ceci a été examiné par Yunchang et Koss (2) sur des tôles de Zircaloy-2 recristallisé non irradiées. Pour les matériaux de gainage, l'effet de la biaxialité a été étudié par de nombreux auteurs avec différents modes de chargement. Kaplar et al (3) ont utilisé des essais de pression interne pour examiner l'impact de la biaxialité dans les conditions de déformation planes et d'équibiaxialité sur du Zr-1% Nb irradié et à faibles vitesses de déformation.

L'essai EDC (Expansion Due à la Compression), reproduit le mode de chargement de la phase de PCMI, puisqu'il consiste à comprimer axialement, entre deux pistons, un média ductile à l'intérieur d'une éprouvette de tube de gaine à extrémités libres. La compression axiale amène le média à augmenter en diamètre, créant ainsi une déformation circonférentielle positive dans la gaine (4) - (9). Cet essai sera appelé par la suite EDC simple. Le rapport de biaxialité des déformations dans l'éprouvette, est dans ce cas proche d'un essai de traction uniaxial et n'est donc pas représentatif de celui rencontré lors de la phase de PCMI d'un RIA.

Afin de produire un rapport de biaxialité des déformations plus représentatif, Nobrega (10) a introduit un dispositif permettant d'empêcher la gaine de se contracter axialement et donc d'augmenter le rapport de biaxialité des déformations. Hellouin de Menibus et al (11) ont utilisé ce type d'essai EDC à extrémité fixe, qui sera nommé EDC bridé par la suite, pour étudier les effets des blisters hydrures sur la rupture des gaines en Zircaloy-4. Ils ont constaté que pour des éprouvettes hydrurées testés à 25 ° C, la déformation à la rupture lors d'un essai EDC bridé est inférieure d'environ 50% à celle mesurée lors d'un essai EDC.

Etant donné que la biaxialité fournie par l'essai EDC bridé ne représente que la borne inférieure de la biaxialité des déformations obtenue lors de la phase PCMI, un essai permettant de solliciter la gaine à des fortes biaxialités tout en gardant le même type de chargement mécanique est requis.

L'objectif de cette étude est donc de développer un essai mécanique, basé sur le principe d'EDC, permettant d'appliquer des niveaux de biaxialité des déformations supérieures à zéro. Cela va permettre par la suite d'étudier la variation de la déformation circonférentielle à la rupture en fonction des différents rapports de biaxialité.

Dans cette étude, les essais sont effectués à la température ambiante avec des vitesses de déformation de l'ordre de  $10^{-4} s^{-1}$ . Le champ de déformation dans chaque éprouvette est mesuré par stéréo-corrélation DIC (Digital Image Correlation) et l'interprétation des essais est supportée par des calculs par éléments finis (FEA).

Ce document est organisé comme suit. Dans la section 2, les deux configurations des essais EDC sont présentées, et la biaxialité de chaque essai est discutée. La section 3 est consacrée à la procédure expérimentale, les conditions des essais et les résultats expérimentaux. Les résultats de calcul pour les 2 configurations sont présentés dans la section 4 pour chaque essai et les déformations simulées et mesurées expérimentalement sont comparées. Enfin, quelques conclusions sont présentées à la section 5.

## **2. Méthode expérimentale**

Les éprouvettes utilisées dans cette étude sont des gaines de combustible en Zircaloy-4 détendu. La longueur, le diamètre extérieur et l'épaisseur de paroi de l'éprouvette sont respectivement de 27 mm, 9,5 mm et 0,57 mm. Le média à l'intérieur de l'éprouvette est en polytétrafluoroéthylène (PTFE) et a une longueur de 14 mm et un diamètre de 8,28 mm.

### **2.1 EDC bridé**

L'essai EDC bridé est une amélioration de l'EDC simple qui consiste à comprimer axialement, entre deux pistons, un média ductile à l'intérieur d'une éprouvette de tube de gaine à extrémités libres. Cet essai consiste à effectuer un essai EDC en bridant les extrémités de l'éprouvette (Figure 1 (a)). Pour ce faire, des bouchons filetés en Zircaloy-4 recristallisé sont soudés par laser aux extrémités d'un tronçon de tube de 27 mm de long. Au cours de l'essai,

la longueur de l'éprouvette ne change pas. Néanmoins, une déformation axiale locale négative notable est obtenue au centre de l'éprouvette en raison de la contraction axiale de la partie située entre la zone gonflée de la gaine et les extrémités encastées en premier degré et du frottement entre le média et la gaine en seconde degré. Pour cette raison, la condition de déformation plane n'est atteinte qu'après un déplacement significatif du piston, lorsque la déformation circonférentielle devient prédominante.

## 2.2 EDC avec traction axial

Un essai EDC avec traction axiale sur la gaine a été développé dans cette étude. La figure 1 (b) présente une illustration schématique du montage. L'essai utilise la même éprouvette, avec les mêmes bouchons et embouts filetés, décrits ci-dessus pour les essais EDC bridé. Les essais ont été effectués sur une machine d'essai de traction standard utilisant un inverseur de force spécial. Les déformations circonférentielles sont toujours générées par la compression d'un média par l'intermédiaire de deux pistons à l'intérieur d'un tronçon de gaine. L'innovation dans cet essai réside au niveau de la déformation axiale. Quatre tirants déformables (deux de chaque côté) sont attachés aux deux supports ainsi qu'à l'écarteur et permettent de contrôler les efforts axiaux transmis à la gaine. L'ouverture de l'inverseur permet à la fois de comprimer le média à l'intérieur de l'éprouvette et de tirer sur l'écarteur sur lequel un tronçon de gainage est fixé. Par conséquent, l'éprouvette est soumise à une charge de traction axiale et circonférentielle au cours de l'essai. La biaxialité de déformation  $\varepsilon_{zz}/\varepsilon_{\theta\theta}$  dans cet essai est contrôlée par le comportement mécanique des tirants. Ces tirants sont conçus pour se déformer plastiquement au cours de l'essai. La force qu'ils appliquent à l'éprouvette varie tout au long de l'essai et est fonction de la géométrie et du comportement mécanique en traction, principalement la limite d'élasticité et la forme d'écrouissage. Des simulations par éléments finis de l'essai EDC avec traction (EDC-T) ont été réalisées afin d'identifier le comportement des tirants permettant d'atteindre les biaxialités recherchées. Parmi les matériaux testés, l'acier 304L a montré un comportement mécanique proche du comportement souhaité. Des simulations aux éléments finis ont ensuite été réalisées pour choisir la section et la longueur des tirants adaptées à la biaxialité choisie.

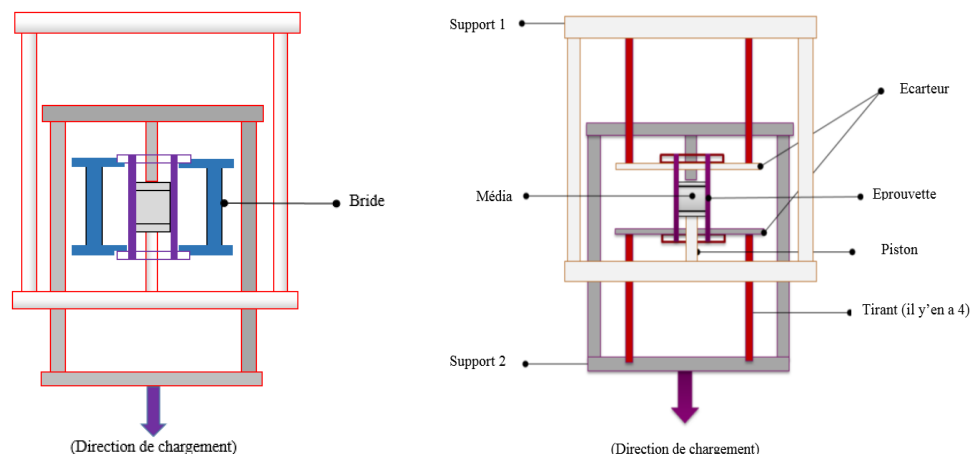


Figure 1 : Schéma explicatif de l'EDC avec traction

## 2.3 Outil de mesure

Tous les essais ont été effectués sur une machine de traction hydraulique MTS équipée d'un capteur de force 100 kN. Pendant l'essai, la charge appliquée et le déplacement de la traverse sont enregistrés en fonction du temps. Les essais ont été effectués à la température

ambiante en utilisant une vitesse de vérin de  $4 \mu\text{m/s}$ , induisant une vitesse de déformation circonférentielle de la gaine de l'ordre de  $10^{-4}\text{s}^{-1}$ . Le champ de déplacement sur la surface extérieure de la gaine a été mesuré par deux caméras (Figure 2), qui sont intégrées à un système de mesure par corrélation d'images numériques 3D.

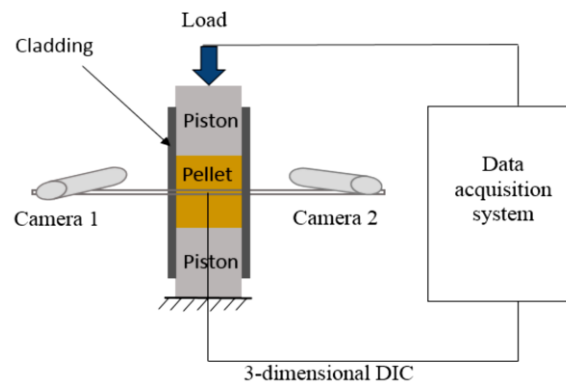


Figure 2 : Schéma représentatif de l'essai EDC et de système de stéréo-corrélation

En plus des déformations mesurées par la corrélation d'image, des jauges biaxiales de grandes déformations de type Ep-08-062TT-120 ont été collées sur la surface non observée de l'éprouvette. Sur une surface plate, ces jauges sont capable d'aller jusqu'à 16 % de déformation. L'utilisation des deux méthodes de mesure va permettre de vérifier la symétrie du chargement appliqué par la compression du média.

### 3. Résultats expérimentaux

Les données expérimentales pour les deux configurations testées sont présentées dans les figures 3. Chaque figure présente la force appliquée par la machine de traction et les déformations axiale et circonférentielle mesurées dans la partie centrale de l'éprouvette en fonction du déplacement du vérin. La Figure 3 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (a) montre l'évolution de la déformation de Green-Lagrange en fonction du déplacement du piston pour les mesures des jauges et des caméras pour l'EDC bridé. Les jauges ont résisté jusqu'à 6 % de déformation circonférentielle avant de se décoller. La déformation circonférentielle à rupture mesurée pour les trois essais réalisés est entre 16% et 18 %. Rappelons que pour l'EDC simple, l'éprouvette n'a pas rompu après 65 % de déformation circonférentielle (12). La différence de comportement est due à l'augmentation du rapport de biaxialité. La figure 3 (b) montre les résultats l'évolution de la force et des déformations axiale et circonférentielle mesurées par le système de stéréo-corrélation pour une biaxialité de 0,25 de l'EDC-T. Dans cet essai, l'éprouvette a rompu à une déformation circonférentielle de 13% et une déformation axiale de 3%.

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, la biaxialité obtenue lors de cet essai varie avec la géométrie des tirants utilisés. La figure 4 montre le trajet des biaxialités jusqu'à la rupture en fonction de la déformation circonférentielle de l'éprouvette pour les essais réalisés avec différentes dimensions de tirants. À côté de chaque trajet de biaxialité, des photos les profils finals des éprouvettes des essais EDC, EDC bridé et EDC-T sont illustrés.

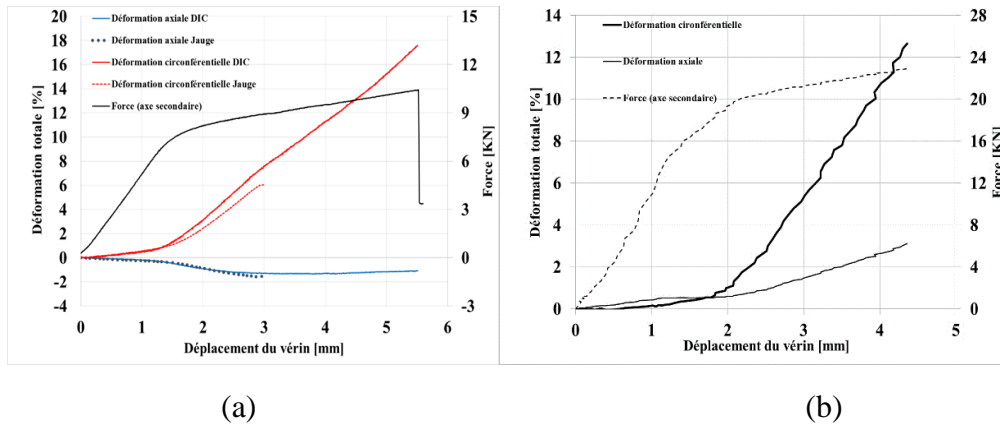


Figure 3 : Evolution de la force et des déformations circonferentielle et axiale mesurées par stéréo-corrélation et par des jauges de déformation en fonction du déplacement du vérin

Comme mentionné ultérieurement, au cours de l’EDC simple, l’éprouvette n’a pas rompu alors qu’une fissure, de la même forme, était présente dans la zone d’interaction média-gaine pour les essais EDC bridé et EDC-T. La fissure naissante au centre de l’éprouvette se propage aisément à travers l’épaisseur à 45° de la direction radiale. La fissure traversante croît ensuite selon la direction axiale de l’éprouvette et étale sur toute la zone d’interaction média-gaine.

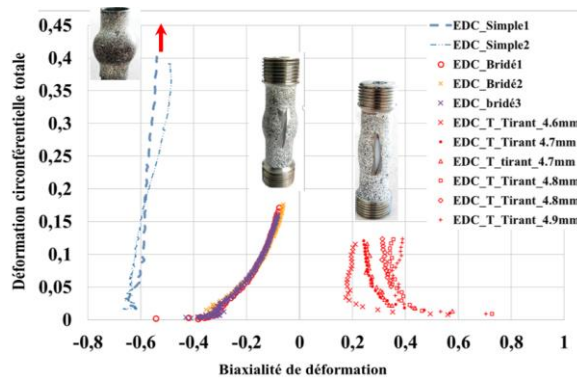


Figure 4 : Évolution de la déformation circonferentielle ( $\epsilon_{\theta\theta}$ ) en fonction de la biaxialité de déformation ( $\epsilon_{zz}/\epsilon_{\theta\theta}$ ) pour les essais EDC, EDC bridé et EDC-T

Les tirants utilisés ont permis de produire des biaxialités entre 0,2 et 0,4, qui sont Les tirants utilisés ont permis de produire des biaxialités entre 0,2 et 0,4, qui sont similaires aux valeurs mesurées dans les expériences CABRI REP-Na et NSRR HBO. Le rapport de déformation évalué au cours de REP-NA3 est d’environ 0,26 (13). L’essai EDC-T permet de donc d’atteindre des rapports de biaxialité à rupture équivalents à ceux rencontrés lors des essais semi-intégraux réalisés dans le réacteur CABRI pour étudier le comportement des crayons combustibles lors de la phase PCMI d’un RIA.

Pour des rapports de biaxialité de déformations compris entre 0,2 et 0,4, la déformation circonferentielle à rupture est comprise entre 12% et 13%. Il ne semble donc pas y avoir d’effet significatif de la biaxialité sur la déformation circonferentielle à rupture dans ce domaine.

D’autre part, l’augmentation de la biaxialité dans le domaine couvert par les essais EDC bridé et l’EDC-T provoque une diminution de la déformation circonferentielle à rupture. Cette déformation passe de 17 % pour l’EDC bridé à 12 % pour l’EDC-T.

Pour encore augmenter la biaxialité, des tirants de diamètre 5 mm ont été testés. Avec cette géométrie, une forte localisation de la déformation axiale en dehors de la zone d'interaction média gaine a été mesurée et l'éprouvette a rompu en guillotine au-dessus de la zone d'intérêt.

#### 4. Simulation numérique

##### 4.1 Technique de simulation

Dans le but de prévoir le comportement des gaines lors d'un essai EDC bridé, des simulations ont été réalisées avec le code d'éléments finis CAST3M. Ces simulations donnent un aperçu de la déformation et des modes de ruptures observés lors des essais. Des éléments finis quadratiques sous-intégrés ont été utilisés pour les calculs, basés sur une formulation de grands déplacements, de grandes rotations et grandes déformations. La géométrie utilisée pour les simulations des essais EDC-T est montrée sur la figure 5, avec les conditions aux limites. Les symétries par rapport à l'axe média-gaine et au plan ne nécessitent la prise en compte que d'un quart de la section axiale du média et de la gaine. Cette simplification a été utilisée dans plusieurs recherches (6-8). Le bord gauche du modèle correspond à l'axe de symétrie et est bloqué dans le sens radial (horizontal). Le bord inférieur du modèle est un plan de symétrie situé dans le plan moyen de l'éprouvette et est encastré dans la direction axiale (verticale). Les tirants sont modélisés comme une seule structure cylindrique avec une section égale à deux fois la section d'un seul tirant utilisé dans les essais. La surface inférieure du tirant est accrochée à la surface supérieure de la gaine. Pendant la simulation, un déplacement axial (vertical) est appliqué à la surface supérieure du tirant. Ce déplacement est de même amplitude mais de sens opposé que le déplacement appliqué à la surface supérieure du piston qui comprime le média. De ce chargement résulte une déformation plastique en traction axiale dans les tirants et la gaine. En même temps, le média se comprime pour appliquer une déformation circonférentielle à la gaine. Les simulations des essais EDC bridé utilisent la même géométrie, mais sans l'utilisation des tirants. Pour les simulations EDC bridé, la surface supérieure de la gaine est encastrée dans la direction axiale (verticale).

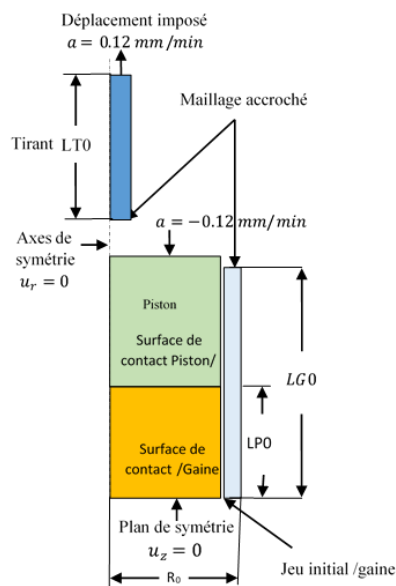


Figure 5 : Géométrie et conditions aux limites utilisées pour la simulation par éléments finis de l'EDC avec traction



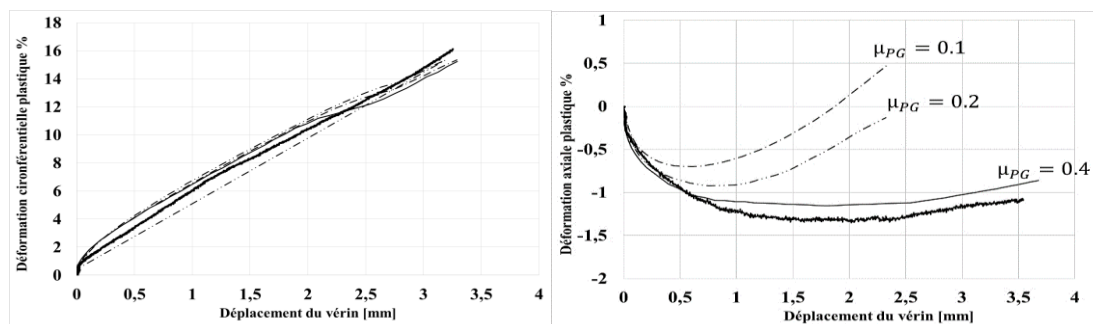
Le comportement mécanique du média en polymère a été calculé en analysant les essais de compression effectués au CEA (13). Un modèle isotrope élastique a été choisi pour la phase élastique, ainsi qu'un modèle isotrope plastique avec écrouissage isotrope linéaire pour la phase plastique. Une loi de comportement plastique anisotrope pour la gaine qui a été spécifiquement identifiée dans les conditions RIA-PCMI par Le Saux et al. (14) a été utilisée. Des essais de traction ont été effectués pour identifier le comportement de l'acier 304L utilisé pour les tirants. Des simulations aux éléments finis ont ensuite été utilisées pour choisir la section et la longueur des tirants.

#### 4.2 Resultats et comparaison avec les essais

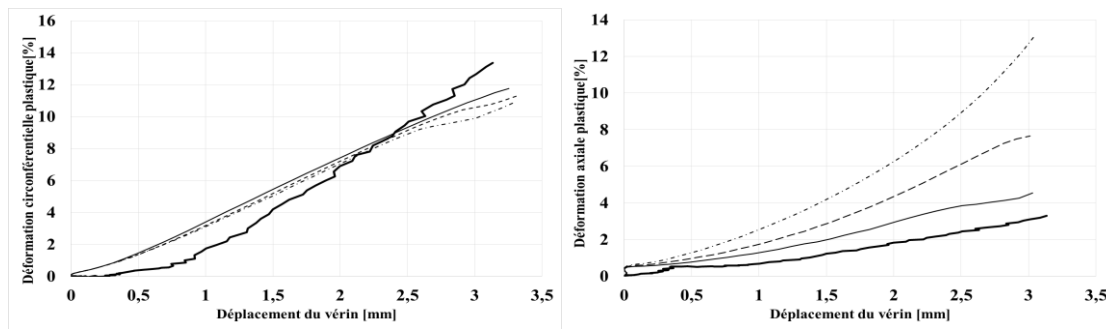
Le coefficient de frottement entre le piston et le média,  $\mu_{PP}$ , a peu d'influence sur la réponse force-déplacement simulée ou sur la déformation locale de l'éprouvette. En revanche, le coefficient de frottement entre le média et la gaine,  $\mu_{PG}$ , a un effet important sur le champ de déformation simulé, la biaxialité des déformations et la réponse force-déplacement. Une large gamme de valeurs pour les coefficients de frottement statique et dynamique entre le PTFE et l'acier a été rapportée dans la littérature. La présente étude suppose que le coefficient de frottement entre le PTFE et le Zircaloy-4 est similaire à celui du PTFE et de l'acier. Des valeurs comprises entre 0,1 et 0,2 sont courantes (8), (14), (15)), mais des recherches ont également signalées des valeurs aussi élevées que 0,4 (16). Il semble que la méthode expérimentale et les conditions d'essai puissent avoir un effet significatif sur le coefficient de frottement mesuré. Dans la présente étude, des simulations ont été effectuées avec des valeurs de 0,1, 0,2 et 0,4.

La Figure 6 permet de déterminer l'influence du coefficient de frottement sur les déformations axiales et circonférentielles, prises dans le plan médian de l'éprouvette, et de comparer ces déformations à celles mesurées expérimentalement. Afin de comparer les déformations mesurées et les déformations calculées, la partie linéaire du déplacement du vérin (déformation élastique de la machine de traction) a été enlevée. Le coefficient de frottement entre le média et la gaine a peu d'influence sur la déformation circonférentielle. Quel que soit le coefficient, un bon accord entre les valeurs de déformation circonférentielle calculées dans les simulations et celles obtenues expérimentalement est constaté. En revanche, le coefficient de frottement entre le média et la gaine a un effet important sur la déformation axiale. Pour l'EDC-T, l'augmentation du coefficient de frottement de 0,1 à 0,4 induit à une diminution de la déformation axiale. Pour un déplacement du piston d'environ 3 mm, elle passe ainsi de 13% à 4% pour un coefficient de frottement de 0,1 et de 0,4, respectivement.

Un coefficient de frottement de 0,4 conduit à la concordance la plus étroite entre les simulations et les résultats expérimentaux. Il est intéressant de noter que (17) a utilisé une valeur de 0,4 pour le coefficient de frottement entre le média et la gaine dans leur simulation.



(a)



(b)

Figure 6 : Influence du coefficient de frottement entre le média et la gaine sur les déformations axiale et circonférentielle pour les EDC simple, EDC bridé et EDC-T

## 5. Conclusion

Au cours d'un accident de réactivité (RIA), la gaine subit un état de chargement multiaxial dans lequel l'interaction mécanique pellet-gaine (PCMI) produit un rapport de biaxialité des déformations  $\varepsilon_{zz} / \varepsilon_{\theta\theta}$  compris entre 0 et 1. Cette étude examine l'effet de ce rapport sur la déformation circonférentielle à rupture pour des échantillons de gainage en Zircaloy-4 détendu.

Deux types d'essais d'expansion due à la compression (EDC), associés à une simulation par éléments finis, ont été réalisés :

- les essais EDC bridé pour lesquels la gaine conserve sa longueur initiale permettent se rapprocher d'un état de déformations planes.
- les essais EDC-T pour lesquels, l'emploi de tirants déformables plastiquement permet de contrôler l'effort axial transmis à la gaine et donc de générer des rapports de biaxialité des déformations positifs.
- compris entre -0,07 et 0,4, associés à des simulations par éléments finis, ont donc été réalisés.

10 essais ont ainsi été réalisés à 20°C à une vitesse de déformation de  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  et ont permis de couvrir une gamme de rapports de biaxialité des déformations comprise entre -0,07 et 0,4. Lors de ces essais, les champs de déformations sont déterminés par stéréo-corrélation d'images et permettent d'obtenir les évolutions des déformations circonférentielles et axiale ainsi que du rapport de biaxialité des déformations.

Les résultats montrent que lorsque le rapport de biaxialité augmente de -0,07 à 0,4, la déformation circonférentielle à rupture diminue et passe ainsi de 17% à 12%. La déformation à rupture diminue donc avec l'augmentation du rapport de biaxialité. On constate cependant que pour des rapports de biaxialité des déformations compris entre 0,2 et 0,4, la déformation circonférentielle à rupture n'évolue pas.

Les simulations par éléments finis ont permis d'une part de dimensionner l'essai EDC-T et d'autre part de vérifier le bon accord avec les résultats expérimentaux.



## References

- [1] **J. Papin, B. Cazalis, J. M. Frizonnet, J. Desquines, F. Petit.** *Summary and Interpretation of the CABRI REP-Na Program.* 2007, Nuclear Technology, pp. 230-250.
- [2] **F.Yunchang, D. A. Koss.** *The Influence of Multiaxial States of Stress on the Hydrogen Embrittlement of Zirconium Alloy Sheet.* 1985. Metall.Trans. Vol. A16 675-681.
- [3] **E. Kaplar, L. Yegorova, K. Lioutov, A. Konobeyev, N. Jouravkova.** *Mechanical Properties of Unirradiated and Irradiated Zr-1% Nb Cladding.* s.l. : U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2001.
- [4] **Grigoriev, V., Jakobsson, R. and Schrire, D.** *Conditions, Experimental Evaluation of Critical Strain Energy Density for Irradiated Cladding under Simulated RIA.* 2001, Proceedings of ENS Topfuel 2001 Stockholm, Sweden.
- [5] **O. Dufourneaud, A.G. Varias, V. Grigoriev, R. Jakobsson and D.Schrire.** *Numerical simulation of the expansion due to compression test.* Tokai, Japan : s.n., 2001. Fuel Safety Research Specialists' Meeting.
- [6] **O. Dufourneaud, A. G. Varias.** *Elastic-Plastic Deformation of a Nuclear Fuel Cladding Specimen under the Internal Pressure of a Polymer Pellet.* Vienna, Austria : s.n., 2002. WCCM V Fifth World Congress on Computational Mechanics.
- [7] **M. Le Saux, C. Poussard, X. Averty C. Sainte Catherine S. Carassou , J. Besson.** *High Temperature Expansion Due to Compression Test for the Determination of a Cladding Material Failure.* San Francisco, California : s.n., 2007. Proceedings of the 2007 International LWR Fuel Performance Meeting.
- [8] **F. Latourte, N. Rupin, M. He, A. Parrot, S. Leclercq.** *Full field measurements used for assessing industrial issues - Two examples.* 2012. Procedia IUTAM 4 .
- [9] **P. Magnusson, A. Alvarez-Holston, K. Ammon, G. Ledergerber, M. Nilsson, D. Schrire, K. Nissen, J. Wright.** *Effects of Zr-hydride distribution of irradiated Zircaloy-2 cladding in RIA-simulating pellet-clad mechanical interaction testing.* 246-252, s.l. : Nuclear Engineering and Technology, 2018, Vol. 50.
- [10] **B.N. Nobrega, J.S. king and G.S. was.** *Improvements in the design and analysis of the segmented expanding mandrel test.* 1985, journal of Nuclear Materials, Vol. 131, pp. 99-104.
- [11] **A. H. Menibus, Q. Auzoux, P. Mongabure, V. Macdonald, T. Le Jolu, J. Besson, J. Crépin.** *Fracture of Zircaloy-4 cladding tubes with or without hydride blisters in uniaxial to plane strain conditions with standard and optimized expansion due to compression tests.* s.l. : Materials Science and Engineering, 2014.
- [12] **A. Zouari M. Bono, D. Le Boulch, T. Le Jolu, J. Besson, J. Crepin.** *EXPANSION DUE TO COMPRESSION TESTS FOR RIA SITUATIONS [Revue]. - Prague : Proceeding of TopFuel 2018, A0089, 2018.*

[13] **NEA.** *Nuclear fuel behaviour under reactivity-initiated accident (RIA) conditions.* 2010, OECD.

[14] **M. Le Saux, J. Besson, S. Carassou, C. Poussard, X. Averty.** *A model to describe the anisotropic viscoplastic mechanical behavior of fresh and irradiated Zircaloy-4 fuel claddings under RIA loading conditions.* 2008, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 379, pp. 60-69.

[15] **M.Dostál, M.Valach, J.Zymák.** *Extension of parametric calculations of the expansion due to compression test using fem model. s.l. : Water Reactor Fuel Performance Meeting, hengdu, China, Sept. 11-14, 2011 T3-032, 2011.*

[16] **Biswas, S. K.** *Changes to near-surface region of PTFE during dry sliding against steel. s.l. : Journal of materials sciences , 1980, Vol. 1877-1885.*

[17] **J. Desquines, D.A. Koss, A.T. Motta, B. Cazalis, M. Petit.** *The issue of stress state during mechanical tests to assess cladding performance during a reactivity-initiated accident (RIA).* 250–267, s.l. : *Journal of Nuclear Materials*, 2011, Vol. 412.