

Identification de lois de fluage par FEMU sur une ROI sans bord libre

T. Jailin^{1,2}, N. Tardif², J. Desquines¹, M. Coret³, M.-C. Baietto², P. Chaudet², V. Georghentum¹

¹ Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSN-RES, Cadarache, Saint Paul lez Durance, 13115, France

² Université de Lyon, CNRS, INSA-LYON, LaMCoS (UMR 5259), Villeurbanne, France

³ GeM (UMR 6183), École Centrale de Nantes, Nantes, France

Résumé — Dans ce travail nous nous proposons d'identifier le comportement au fluage d'une structure initialement tubulaire sur laquelle est appliqué un chargement thermomécanique hétérogène. La ROI représente une portion de ce tube sans bord libre, sur laquelle des mesures de champs surfaciques faiblement couplées thermique/cinématique sont réalisées. L'identification est effectuée par recalage par éléments finis (FEMU). L'influence des conditions aux limites, appliquées aux bords de la ROI, sur la sensibilité des paramètres de la loi à identifier est mise en évidence à partir d'essais virtuels.

Mots clés — FEMU, conditions aux limites, ROI, sensibilités

1 Introduction

L'accident de réactivité RIA (*reactivity initiated accident*) est l'un des accidents de dimensionnement étudiés en France pour les réacteurs à eau pressurisée. Dans un tel accident, les crayons de combustibles, en alliage de Zirconium, peuvent être soumis à de sévères conditions thermomécaniques. Le chargement a lieu en deux étapes : la première, d'interaction entre la gaine et le combustible, et la suivante, induite par l'ébullition du réfrigérant. Lors de cette seconde phase, des transitoires thermiques de plus de 1000°C/s jusqu'à des températures supérieures à 900°C peuvent être enregistrés sur la gaine alors que celle-ci est intérieurement pressurisée par un mélange de gaz de remplissage et de gaz de fission relâchés. Ces conditions induisent des déformations en ballonnement de la gaine susceptibles de mener à sa potentielle rupture. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement thermomécanique de la gaine sous de telles conditions de chargement.

Le banc d'essai de fluage développé par D. Campello [1],[2], a été adapté afin de reproduire des conditions thermomécaniques simulant la seconde phase d'un accident RIA [4]. L'application d'un transitoire thermique rapide génère une distribution de température hétérogène sur l'éprouvette. Les conditions de chargement subies par la gaine ne sont connues que sur la zone observée par les caméras. La modélisation de l'ensemble de l'éprouvette, en vue d'une identification par FEMU (*finite element method updating*), n'est donc pas envisageable.

Seule la ROI (*region of interest*), où les champs thermique et cinématique sont connus, est ici modélisée. Les conditions aux limites sur le pourtour de la ROI sont imposées à l'aide des déplacements obtenus par stéréo-corrélation et par la mise en place d'une cinématique de Love-Kirchhoff dans l'épaisseur de la gaine. L'identification d'une loi de fluage de type Norton peut alors être réalisée par FEMU sur les déplacements de la surface externe de l'éprouvette. L'impact des conditions aux limites sur la vitesse de convergence et la robustesse de l'algorithme d'identification sont présentés afin d'optimiser le processus itératif.

La première partie présente le banc de fluage ELLIE. La modélisation de la zone d'intérêt et la gestion des conditions aux limites sont détaillées en deuxième partie. Enfin, le recalage d'une loi de fluage par FEMU et la sensibilité de l'identification aux conditions aux limites sont présentés dans la troisième partie.

2 Essais de fluage en conditions thermomécaniques simulant un RIA

2.1 Le dispositif de fluage ELLIE

La plateforme expérimentale ELLIE, présentée sur la Figure 1.a, est un banc de fluage qui permet de simuler les conditions thermomécaniques subies par la gaine lors de situations accidentelles. Les éprouvettes sont des tronçons de gaine vierge en Zircaloy-4 SRA (*stress relieved annealed*) de 90mm de long. Elles ont un diamètre extérieur de 9.5mm et une épaisseur de 0.57mm. La structure du banc se compose d'une machine de traction hydraulique Schenck 10kN reliée à un circuit de pressurisation qui permet la mise en pression interne contrôlée des éprouvettes jusqu'à 70 bar à l'aide d'argon. Un système de chauffage par induction permet de chauffer les échantillons jusqu'à des vitesses de 1500°C/s. La longueur de la ROI (*region of interest*) est caractérisée par l'espacement entre les spires supérieures et inférieures et est d'environ 12mm (Figure 1.b). Le contrôle de la température pendant les essais est réalisé à l'aide d'un pyromètre Metis 322 de longueur d'onde $\lambda = [1.45 - 1.65] \mu\text{m}$. Trois thermocouples (type K, diamètre de 79 μm) sont également thermo-soudés sur une génératrice de l'éprouvette.

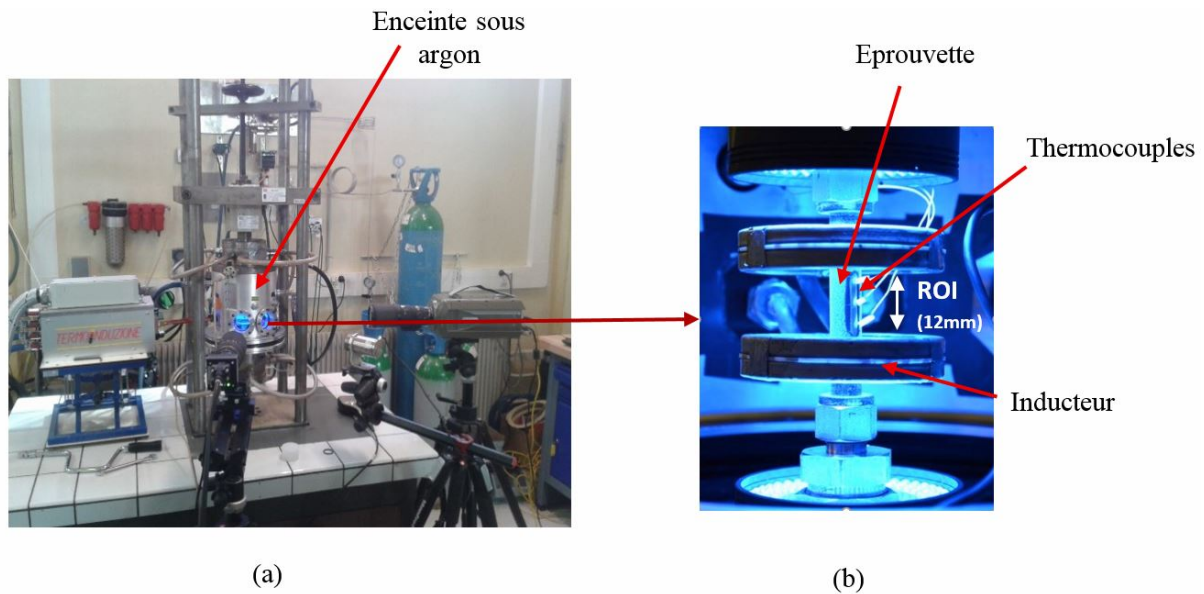


FIGURE 1 – Banc d'essai ELLIE : (a) vue d'ensemble ; (b) vue de l'échantillon

Afin de minimiser l'oxydation de l'échantillon à haute température, les essais se déroulent à l'intérieur d'une enceinte sous balayage d'argon. Des mesures optiques sont réalisées par des caméras en continu pendant les essais via des vitres en saphir disposées sur le pourtour de l'enceinte.

Du fait de la faible épaisseur des échantillons, et de la profondeur de pénétration du champ électromagnétique, la distribution thermique dans l'épaisseur de la gaine est considérée comme homogène pendant les essais. Cette hypothèse a été vérifiée à l'aide de simulations couplées électro-thermiques réalisées sur les logiciels Sysweld et Abaqus.

2.2 Protocole des essais de fluage réalisés

Le schéma de chargement suivi pour réaliser les essais de fluage est illustré sur la Figure 2. Dans ces essais, le chargement mécanique est tout d'abord mis en place. Celui-ci se compose d'une pression interne P_i et d'une force de compression F_z . Cette force de compression est calculée afin de compenser l'effort induit par la pression interne sur les mors (cf Équation 1, où R_i est le rayon interne de la gaine).

$$F_z = P_i \cdot \pi \cdot R_i^2 \quad (1)$$

Une fois le chargement mécanique stabilisé, la température de consigne est atteinte avec une vitesse de l'ordre de 1000°C/s. L'ensemble des chargements est ensuite maintenu constant afin d'observer le fluage en ballonnement de la gaine.

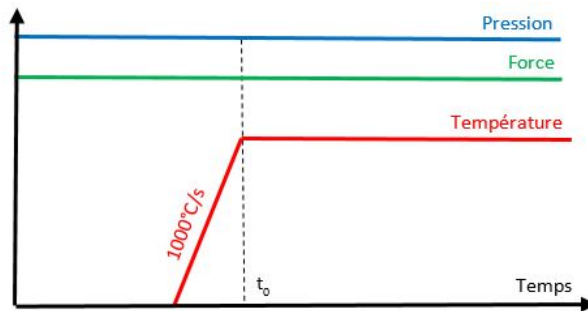


FIGURE 2 – Schéma de chargement suivi lors des essais de fluage

2.3 Moyens de mesures de champs

Deux caméras CMOS 12MPx sont utilisées pour prendre des images de la ROI pendant les essais à des fréquences allant jusqu'à 55Hz. Ces caméras sont utilisées pour reconstruire à la fois le champ cinématique surfacique 3D, par stéréo-corrélation d'images numériques, et le champ thermique par thermographie proche infrarouge (PIR). Le logiciel de stéréo-corrélation globale UFreckles [6], [7], développé par J. Réthoré, est utilisé pour reconstruire à chaque pas de temps le champ de déplacements surfacique 3D. Des éléments Q4 de $35 \times 35 \text{px}^2$ sont utilisés pour cette analyse ($1 \text{px} \simeq 9 \mu\text{m}$).

Les mêmes images sont utilisées pour réaliser à la fois la mesure du champ cinématique par 3D-CIN et la thermographie PIR. Un couplage faible entre les deux méthodes est donc mis en place afin d'obtenir aux mêmes endroits et aux mêmes instants les mesures thermiques et cinématiques, et ce, sans besoin d'interpolations. Aucune opération de filtrage ou de lissage sur le champ thermique ne se révèle alors nécessaire. Un exemple de champs obtenus est présenté sur la Figure 3 [3], [4].

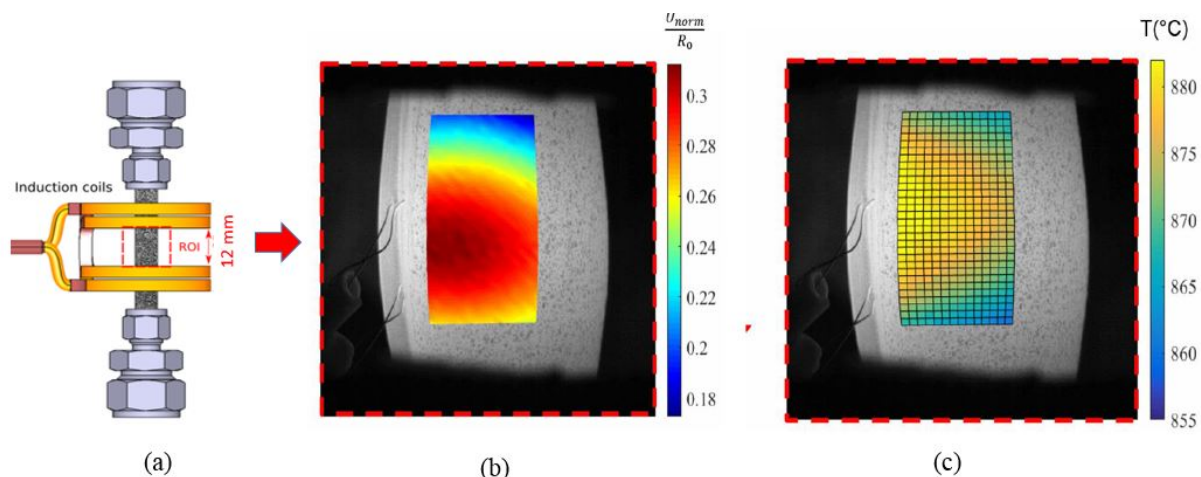


FIGURE 3 – Exemple de champs obtenus : (a) Schéma l'éprouvette et position de la ROI; (b) Champ cinématique obtenu par stéréo-corrélation : magnitude du déplacement normalisée par rapport au rayon initial de la gaine (U_{norm}/R_0); (c) Champ thermique obtenu par thermographie proche infrarouge

3 Modélisation EF des essais hétérogènes

Les transitoires thermiques rapides souhaités lors des essais ne permettent pas d'envisager un chargement thermique axisymétrique car une infime excentration de l'inducteur par rapport à l'éprouvette induit une perte importante d'axisymétrie. Une modélisation axisymétrique des essais n'est donc pas envisageable pour identifier convenablement un modèle de comportement. Seule la ROI, où les champs cinématique et thermique sont connus (Figure 3), est donc modélisée.

3.1 Modélisation de la ROI

Le maillage de corrélation, utilisé pour réaliser les mesures de champs, est "extrudé" afin d'obtenir un maillage 3D de la ROI (Figure 4). Deux mailles, sur tout le pourtour du maillage de corrélation, ne sont pas prises en compte afin de calculer les rotations et minimiser l'impact du bruit sur le bord du maillage. 6 éléments C3D8I (Abaqus) sont utilisés dans l'épaisseur pour obtenir la convergence du maillage.

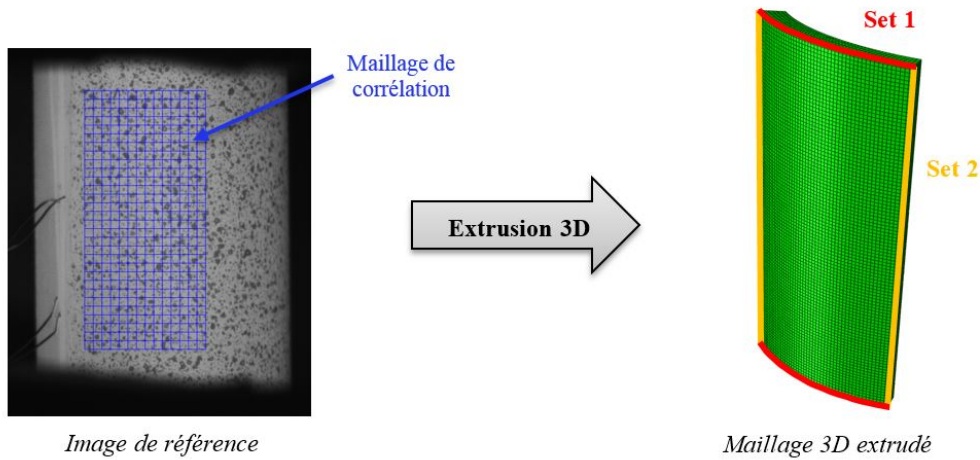


FIGURE 4 – Maillage surfacique de corrélation et maillage volumique éléments finis

3.2 Application des conditions aux limites

La pression interne enregistrée pendant les essais est directement appliquée en surface interne de la zone maillée. Le champ de température, obtenu par thermographie proche infrarouge, est appliqué à chaque nœud et chaque pas de temps avec l'hypothèse de température homogène dans l'épaisseur.

Les trois déplacements U_r, U_θ et U_z , obtenus par stéréo-corrélation, sont appliqués aux nœuds extérieurs du pourtour de la zone maillée (set 1 et 2 Figure 4, et nœud rouge Figure 5). Les déplacements des nœuds internes du pourtour (nœuds bleus de la Figure 5.a) sont contraints par une hypothèse de Love-Kirchhoff, où la section plane reste plane et perpendiculaire à la ligne neutre. Afin d'appliquer cette condition, la normale à la section \vec{n} est calculée à chaque nœud maître et est réactualisée à chaque pas de temps via les coordonnées des voisins, obtenues par stéréo-corrélation (Figure 5.b). Les nœuds esclaves sont finalement contraints de rester en tout temps sur leur normale respective, tout en gardant leur degré de liberté suivant cette normale.

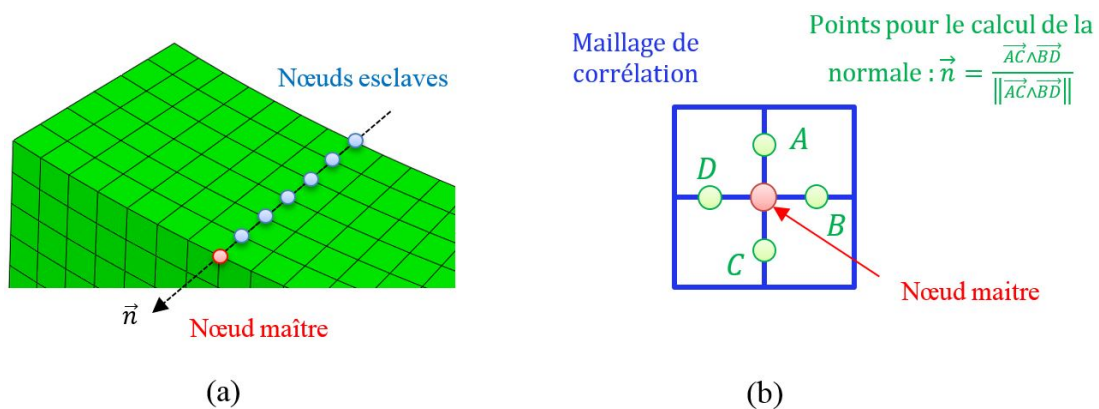


FIGURE 5 – Application des conditions aux limites sur le pourtour de la zone maillée : (a) Conditions aux limites dans la section ; (b) Calcul de la normale

4 Identification d'une loi de fluage par FEMU

4.1 La méthode FEMU

Une identification par FEMU a été mise en place pour identifier le comportement au fluage de la gaine. Cette méthode itérative est basée sur la minimisation d'une fonction coût afin d'identifier un jeu de paramètres matériau λ cherché. Cette fonction est classiquement définie comme suit :

$$er^2(\lambda) = (U_{exp} - U_{num}(\lambda))^t \cdot M \cdot (U_{exp} - U_{num}(\lambda)). \quad (2)$$

Où U_{exp} rassemble les déplacements obtenus par stéréo-corrélation, $U_{num}(\lambda)$ est le champ de déplacement calculé numériquement à l'aide du jeu de paramètres λ , et M est une matrice de pondération qui permet de prendre en compte les incertitudes de mesures obtenues lors des essais [5]. En pratique, la minimisation de cette fonction coût est souvent réalisée à l'aide d'un algorithme de Newton-Gauss où la réactualisation des paramètres à chaque itération peut être écrite telle que :

$$\delta\lambda = H^{-1} J^t M (U_{exp} - U_{num}(\lambda)). \quad (3)$$

Avec J la matrice de sensibilité des paramètres (i.e., $\delta U_{num} = J\delta\lambda$), et H la matrice Hessienne approchée ($H = J^t M J$).

4.2 Identification en deux étapes

La sensibilité des paramètres sur la zone maillée est relativement faible du fait que tous les nœuds de pourtour extérieur sont contraints dans les trois directions. Afin de gagner en sensibilité et accélérer le processus d'identification, les déplacements axiaux et radiaux des nœuds maîtres du set 2 (Figure 4.b) peuvent être relâchés, alors que les trois déplacements restent imposés sur le set 1. Ce relâchement des conditions aux limites impose d'avoir une estimation proche de la valeur des paramètres à identifier.

Une première étape d'identification, pour laquelle l'ensemble des sets 1 et 2 est entièrement contraint, est tout d'abord réalisée. Cette étape permet de se rapprocher du jeu de paramètres cherché en limitant les problèmes de convergence de l'algorithme. Une fois la première étape convergée, le nouveau jeu obtenu est affiné en relâchant les déplacements U_r et U_z sur le set 2. Un calcul de validation, utilisant le jeu de paramètres final identifié, est finalement réalisé en contraignant à nouveau l'ensemble du pourtour dans les trois directions.

4.3 Application à un cas test virtuel

Trois essais virtuels, pour lesquels l'ensemble de la gaine a été modélisée, sont simulés afin de valider la méthode. Dans ces essais, le chargement thermique est non-axisymétrique et présente une distribution thermique circonférentielle de 25°C. Les conditions de chargement appliquées et les déformations maximales obtenues pour les trois essais sont détaillées dans le Tableau 1.

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Température maximale (°C)	930	950	950
Pression interne (bar)	11	7	11
$\epsilon_{\theta\theta}$ maximale	24%	5%	17%

TABLE 1 – Conditions de chargement et déformations circonférentielles maximales des essais virtuels

Une loi de type Norton (cf eq. 4) a été choisie pour décrire le comportement au fluage du matériau. Trois paramètres sont à définir dans ce modèle dont les valeurs de référence sont détaillées dans le Tableau 2.

$$\dot{\epsilon}_{eq} = A \cdot \sigma_{eq}^n \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \quad (4)$$

Où $\dot{\epsilon}_{eq}$ est la vitesse de fluage équivalente, σ_{eq} est la contrainte au sens de von Mises, R est la constante des gaz parfaits et T est la température.

	$\ln(A)$	n	Q
Paramètres de référence	11	4	250 000
Paramètres perturbés initiaux	4	1,5	120 000
Paramètres convergés	10,9	3,98	248 987
Erreur relative (%)	0,5	0,5	0,4

TABLE 2 – Paramètres de références, paramètres perturbés et paramètres convergés

Pour les trois essais, les déplacements obtenus sur une zone de longueur $L = 10mm$ et d'arc de cercle $\theta = 50^\circ$ sont extraits afin de modéliser la ROI. Les paramètres matériaux sont ensuite fortement perturbés (cf Tableau 2) et une identification suivant le protocole décrit section 4.2 est réalisée sur l'ensemble des essais afin de retrouver les paramètres de référence.

4.4 Résultats d'identification du cas virtuel

Les résultats de la FEMU sont présentés sur la Figure 6. La sensibilité de l'essai 2 est détaillée comme exemple plus précisément sur la Figure 7 : la surface de sensibilité moyenne à l'instant $t = 48s$ est présentée Figure 7.a et l'évolution temporelle de la sensibilité moyenne d'un nœud au centre de la ROI est présentée la Figure 7.b. La sensibilité moyenne S_{mean} est ici décrite suivant l'Équation 5.

$$S_{mean} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \left| \frac{U(\lambda) - U(\lambda + \delta\lambda_i)}{U(\lambda)} \right| \quad (5)$$

Où λ est le jeu de paramètres tel que $\lambda = \{A, n, Q\}$, et $\delta\lambda_i$ est une petite perturbation appliquée au paramètre i .

Une diminution rapide du résidu lors des premières itérations est visible sur la Figure 6.a, lorsque le pourtour de la ROI est entièrement contraint. L'évolution des paramètres est en revanche lente malgré des valeurs éloignées de celles de référence.

Les déplacements radiaux et axiaux sont relâchés sur le set 2 à l'itération 8 (courbe orange de la Figure 6) lorsque l'évolution des paramètres devient inférieure à 5%. Un gain de sensibilité important est enregistré, comme présenté sur la Figure 7. Toute la sensibilité circonférentelle est "récupérée" (Figure 7.a). Cette augmentation de la sensibilité permet d'accélérer le processus de convergence, comme présenté sur la Figure 6. Après 5 itérations, le calcul partiellement relâché est convergé. Les paramètres obtenus sont présentés dans le Tableau 2. Les écarts obtenus avec les valeurs de référence mènent à des différences de moins de 0,3% sur les vitesses de fluage obtenues entre le jeu de paramètres de référence et le jeu convergé.

Les paramètres convergés sont finalement utilisés dans la modélisation de référence pour laquelle l'ensemble de la gaine est modélisée. Les écarts maximum sur les déplacements sont de 0,5% par rapport aux déplacements obtenus avec le jeu de paramètres de référence. La méthode est donc considérée comme validée.

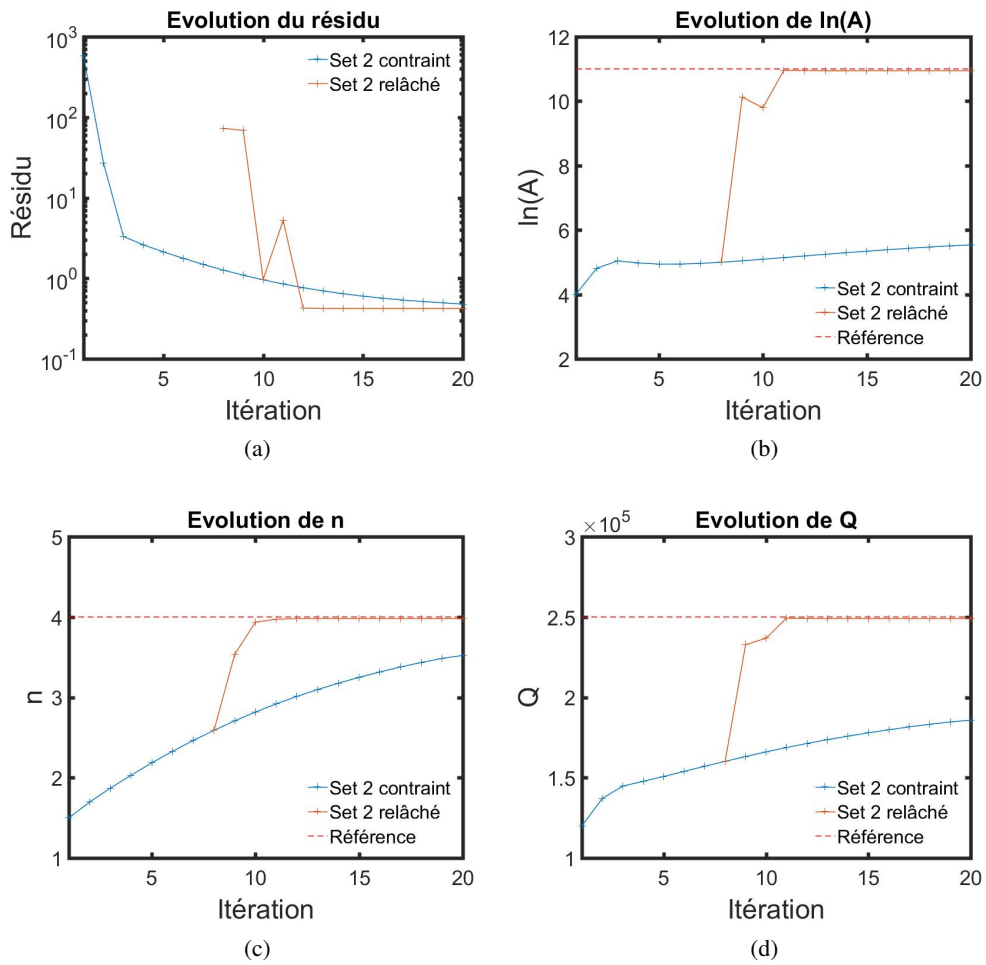


FIGURE 6 – Résultats de la FEMU pour le calcul entièrement contraint (bleu) et le calcul partiellement relâché (orange). (a) Évolution du résidu (Équation 2); (b) Évolution de A ; (c) Évolution de l'exposant n ; (d) Évolution de l'énergie d'activation Q

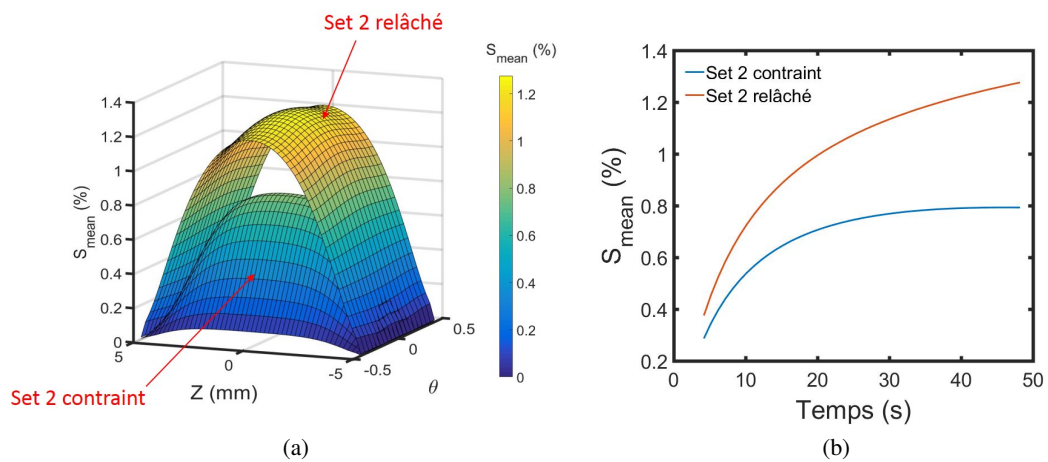


FIGURE 7 – Comparaison de la sensibilité moyenne entre le calcul entièrement contraint et le calcul partiellement relâché pour l'essai 2. (a) Surface de sensibilité moyenne à $t = 48s$; (b) Évolution temporelle de la sensibilité moyenne au centre de la ROI

5 Conclusion

Un banc d'essai permettant de simuler des conditions de chargement représentatives de la seconde phase d'un accident RIA a été développé. La mise en place de mesures de champs faiblement couplés, cinématique et thermique, permet l'identification de lois de fluage par la méthode inverse FEMU.

Les essais étant non-axisymétriques, une modélisation de la ROI, basée sur une hypothèse de Love-Kirchhoff, a été mise au point. Ce type de modélisation permet d'identifier des lois de comportement pour des essais hétérogènes pour lesquels les conditions de chargement sur l'ensemble de l'éprouvette ne sont pas connues.

Une identification en deux étapes est proposée afin de gagner en sensibilité sur les paramètres cherchés et limiter les problèmes de divergence. Ce processus permet de réduire fortement le nombre d'itérations nécessaires tout en ayant une identification robuste des paramètres.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier J. Réthoré, pour les échanges autour de l'identification et pour la mise à disposition du logiciel UFreckles, ainsi que EdF pour son soutien financier.

Références

- [1] D. Campello, N. Tardif, M. Marwa, M.-C. Baietto, M. Coret and J. Desquines. Identification of the steady-state creep behavior of Zircaloy-4 claddings under simulated Loss-Of-Coolant Accident conditions based on a coupled experimental/numerical approach. *International Journal of Solids and Structures*, 115, p. 190-199, 2017.
- [2] D. Campello, N. Tardif, J. Desquines, M.-C. Baietto, M. Coret, A. Maynadier and P. Chaudet. Validation of a multi-modal setup for the study of Zirconium alloys claddings' behavior under simulated LOCA conditions. *Strain*, 1339, 2017.
- [3] T. Jailin, N. Tardif, J. Desquines, M. Coret, M.-C Baietto, T. Breville, P. Chaudet and V. Georgenthum. Multi-modal setups for the study of fresh Zircaloy-4 claddings under simulated thermal-mechanical RIA conditions. *PhotoMechanics*, 2018.
- [4] T. Jailin, N. Tardif, J. Desquines, M. Coret, M.-C Baietto, T. Breville, P. Chaudet, V. Georgenthum and C. Bernaudat. Mechanical behavior of as-fabricated Zircaloy-4 claddings under the simulated thermo-mechanical post-DNB conditions of a Reactivity Initiated Accident (RIA). *TopFuel*, 2018.
- [5] F. Mathieu, H. Leclerc, F. Hild, and S. Roux. Estimation of elastoplastic parameters via weighted FEMU and integrated-DIC. *Experimental Mechanics*, 55(1), 105-119. 2015.
- [6] J. Réthoré. UFreckles (Version v 2.0). Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1433776> , 2018
- [7] J. Réthoré, T. Elguedj, P. Simon and M. Coret On the use of NURBS functions for displacement derivatives measurement by digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 50(7), 1099-1116. 2010