



**HAL**  
open science

## Laminage de tubes ODS

Katia Mocellin, Esteban Vanegas, Jérémy Veysset, Elise Deloye, Roland E. Logé

► **To cite this version:**

Katia Mocellin, Esteban Vanegas, Jérémy Veysset, Elise Deloye, Roland E. Logé. Laminage de tubes ODS. 20ème Congrès Français de Mécanique - CFM 2011, Aug 2011, Besançon, France. 6 p. hal-00679450

**HAL Id: hal-00679450**

**<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00679450>**

Submitted on 22 Mar 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Laminage de tubes ODS

K. Mocellin<sup>a</sup>, E. Vanegas<sup>a</sup>, J. Veysset<sup>a</sup>, E. Deloye<sup>b</sup>, R. Logé<sup>a</sup>

a. MinesParisTech, CEMEF - Centre de Mise en Forme des Matériaux, CNRS UMR 7635, BP 207, 1 rue Claude Daunesse, 06904 Sophia Antipolis Cedex, France  
b. Valinox Nucléaire, 5, avenue du Général Leclerc B.P. 50  
21500 MONTBARD - FRANCE

## Résumé :

*Ce travail porte sur la mise en œuvre de procédé de fabrication de tubes pour des nuances ODS par laminage à pas de pèlerin. Après avoir introduit brièvement les procédés qui permettront de réaliser des tubes ODS à l'échelle de laboratoire puis à l'échelle industrielle, nous traiterons du choix des lois de comportement adaptées pour étudier les nuances ODS dans les sollicitations liées au laminage et de la détermination des paramètres de ces lois. On se penchera enfin sur la modélisation éléments finis des procédés eux-mêmes. L'objectif est de pouvoir suivre précisément l'histoire mécanique complexe subie par un élément de matière du tube.*

## Abstract :

*This paper deals with manufacturing of ODS tube using cold pilgering processes. After a brief description of both industrial and lab rolling devices, the choice of the behaviour law will be discussed. The parameters identification procedure will be presented. Finally, the numerical modelling of both processes will be detailed emphasizing the aim of being able to study the mechanical history of material points of the tube.*

**Mots clefs :** Laminage, nuance ODS, éléments finis, identification par analyse inverse

## 1 Le laminage à pas de pèlerin

### 1.1 Le principe

Le laminage à pas de pèlerin est une opération de mise en forme à froid d'un tube sans soudure. Le tube est placé sur un mandrin central qui permet de calibrer le diamètre interne final du tube. Le passage d'outils répartis autour du tube, réduit simultanément l'épaisseur et le diamètre d'un tube par déformation plastique. Au cours ou en fin de passage de l'outil, l'ébauche (le tube) est avancée et tournée. On choisit un angle qui ne soit pas un sous-multiple simple de  $\pi$  pour éviter qu'une particule matérielle ne soit laminée toujours aux mêmes positions ortho radiales, ce qui peut amener à polygonaliser le tube. Un élément de matière donné se déplace vers l'aval de la zone de déformation ; l'entrefer qui est laissé à cet élément décroît, ce qui assure que le coup de cage suivant assurera la réduction d'une autre zone du tube. La zone de déformation fait quelques centaines de millimètres de longueur, ce sont donc plusieurs dizaines de coups de cage qui seront nécessaires pour qu'une section du tube soit entièrement déformée.

#### 1.1.1 Le laminage HPTR

Pour le laminage de type HPTR (High Pressure Tube Reduction), l'outillage est constitué de 3 galets (axisymétriques) qui tournent autour de leur axe pendant qu'ils se déplacent tout au long de l'axe de laminage. Pour les gammes de fabrication qui nous intéressent, le tube est tourné et avancé après un aller-retour des galets.

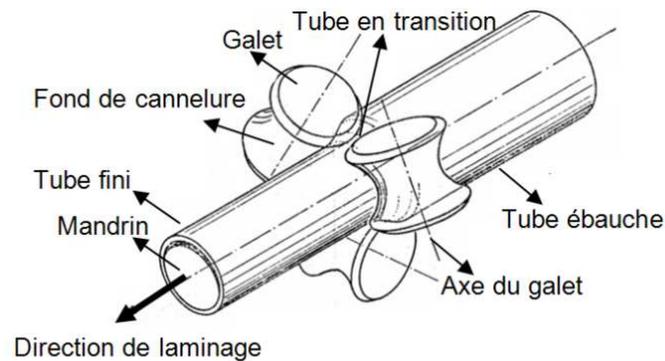


FIG. 1 – Schéma de principe du laminage HPTR

### 1.1.2 Le laminage VMR

Pour le laminage de type VMR, les outils sont 2 cannelures qui avancent en tournant sur le tube suivant l'axe de laminage. Le coup de cage est défini par un passage aller des outils, une rotation du tube, un retour des outils et enfin d'une avance-rotation du tube.

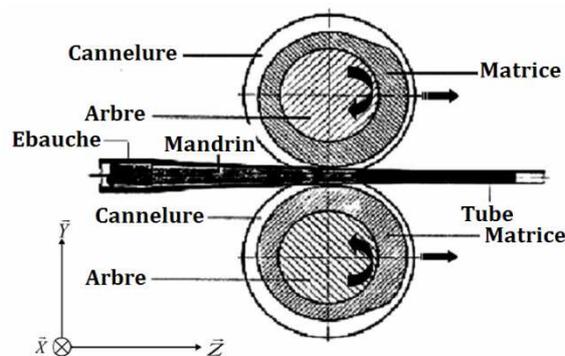


FIG. 2 – Schéma de principe du laminage HPTR

## 1.2 Les sollicitations de la matière pendant le procédé

Chaque coup de cage impose localement au tube un incrément de déformation plastique de quelques pour-cent, la matière subit au final une série de petites déformations tridimensionnelles, avec une triaxialité variable [1]. Cette histoire mécanique complexe peut conduire à la nucléation de défauts (fissures longitudinales) dans le régime de la fatigue oligocyclique [2].

Une première analyse numérique du procédé HPTR a été réalisée dans [3] pour un matériau de type Zircaloy-4 en utilisant une loi monotone classique. Les niveaux de contrainte relevés sont trop élevés car l'adoucissement/durcissement cyclique du matériau n'est pas pris en compte avec ce type de formalisme.

Le problème de mise au point des gammes de laminage est d'autant plus critique pour des aciers ODS car la présence des nano oxydes renforce leurs caractéristiques mécaniques mais abaisse leur capacité à être déformés. Le matériau doit donc subir une série de traitements thermiques pour abaisser ses caractéristiques mécaniques [4]

Pour étudier la faisabilité des gammes de laminage il faut être capable de renseigner une loi de comportement réaliste dans le logiciel. Cette loi doit être identifiée à partir d'essais réalisés sur des éprouvettes ayant subi des traitements thermiques adaptés à chaque nuance.

## 2 Détermination de la loi de comportement et identification des paramètres

### 2.1 Les essais

La production d'échantillons en aciers renforcés pas ODS est difficile car elle nécessite la maîtrise de diverses étapes d'élaboration délicates : le co-broyage des poudres, la mise en container et le filage à chaud qui amène à la consolidation du matériau. L'approvisionnement en éprouvettes est également limité par le coût de la matière première. La réalisation d'essais en condition cyclique ne pourra, en conséquence, être réalisée que sur une seule éprouvette qui sera soumise à un chemin de sollicitation complexe où la vitesse de déformation est fixée et l'amplitude de déformation varie de  $\pm 0.2\%$ ,  $\pm 0.3\%$ ,  $\pm 0.4\%$ ,  $\pm 0.5\%$ ,  $\pm 0.7\%$ ,  $\pm 1\%$  avant de revenir à  $\pm 0.5\%$  et finalement remonter à  $\pm 1.5\%$  et  $\pm 2\%$ .

## 2.2 La loi de comportement

Le modèle de comportement cyclique développé par Chaboche [5] a été implémenté pour décrire le comportement élasto-plastique du matériau. Ce modèle est décrit par une décomposition du critère de plasticité en une partie cinématique et une partie isotrope. Chacune des ces parties est définie par un système d'équations différentielles. La formulation choisie ici est décrite par l'expression suivante de la surface de plasticité :

$$f = J_2(\underline{\sigma} - \sum_i \underline{X}_i) - \sum_i R_i - \sigma_y \leq 0 \quad (1)$$

où  $\sigma_y$  est la surface de charge initiale,  $\underline{X}$  est le tenseur des contraintes cinématiques internes et  $R$  représente l'écrouissage isotrope.

L'écrouissage cinématique est décrit par le modèle non linéaire Lemaître-Chaboche:

$$d\underline{X}_i = \frac{2}{3} C_i \underline{\dot{\epsilon}}^p - \gamma_i \dot{p} \quad (2)$$

$C_i$  et  $\gamma_i$  sont des constantes liées au matériau,  $\underline{\dot{\epsilon}}^p$  est le tenseur des vitesses de déformation et  $\dot{p}$  la vitesse de déformation plastique.

La variable d'écrouissage isotrope est introduite pour décrire les phénomènes d'écrouissage cyclique durcissement et/ou adoucissement. Son évolution est gouvernée par la déformation plastique cumulée. L'état stabilisé est atteint lorsque  $R$  atteint la valeur asymptotique  $Q$  :

$$R_i = Q_i (1 - \exp(-b_i p)) \quad (3)$$

$Q_i$  et  $b_i$  sont des constantes. Comme on le verra, dans la suite, une solution satisfaisante est trouvée en utilisant un modèle à 2 variables cinématiques ( $\underline{X}_1$  and  $\underline{X}_2$ ) et deux variables isotropes ( $R_1$  and  $R_2$ ). Ce modèle a été implémenté dans le logiciel éléments finis utilisé.

## 2.3 Identification des paramètres

Les paramètres sont identifiés par une procédure semi-automatique où on utilise le module d'optimisation du logiciel éléments finis.

- Un premier jeu est évalué par analyse inverse en simulant le cycle stabilisé obtenu pour une amplitude de déformation de 1%. A cette amplitude, on observe une déconsolidation minimale entraînant une chute de 50 Mpa sur la demi-amplitude de contrainte (figure 3). On considère donc les paramètres isotropes à 0 pour cette première étape et on identifie  $C_i$  et  $\gamma_i$ ,  $i=1,2$ .
- Connaissant les paramètres de la partie cinématique, on identifie par une série de tests les valeurs des paramètres de la partie isotrope sur le cycle stabilisé à une amplitude de 1%
- Les paramètres liés à l'écrouissage cinématique sont ensuite recalibrés par analyse inverse en prenant en compte le cycle stabilisé à 0.7% et le passage transitoire vers le premier cycle à 1%.

La comparaison des courbes expérimentales et numériques est présentée en figure 3.

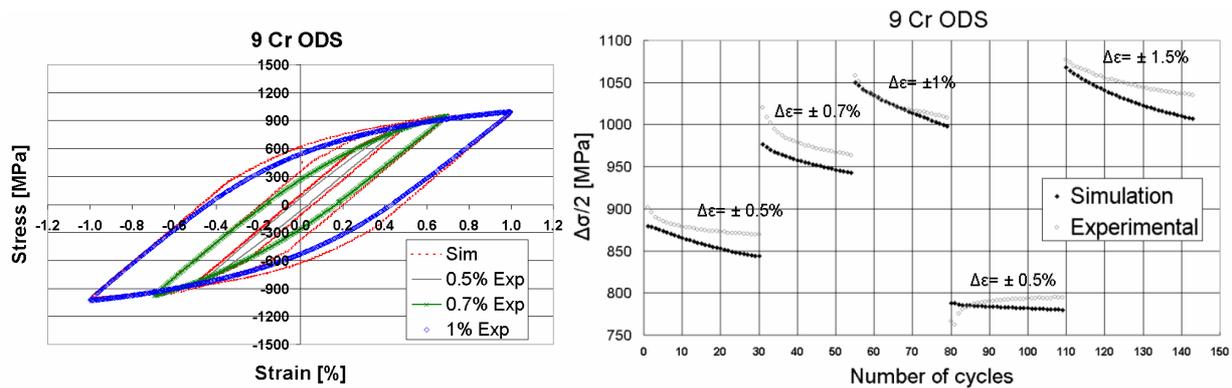


FIG. 3 – Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour l'identification des paramètres matériau à partir d'essais cycliques ;

### 3 Simulation numérique des procédés

La première difficulté pour la simulation de procédés de type laminage à pas de pèlerin est la prise en compte de l'aspect incrémental de la déformation. Certains auteurs ont fait le choix de simplifier la modélisation du procédé en considérant la déformation sur une configuration quasi stationnaire du procédé [2] pour diminuer les temps de calcul des simulations du procédé. On a choisi ici d'étudier l'ensemble des événements de déformation vu par la matière. On se limite simplement à l'étude d'une portion du tube (20mm). Les extrémités du tube ne sont pas représentatives de l'histoire du matériau car les conditions de bord libre d'un coté et les conditions de déplacements imposés de l'autre coté entraînent des perturbations. On étudie alors l'histoire thermomécanique du matériau sur la portion intérieure du tube (figure 4).

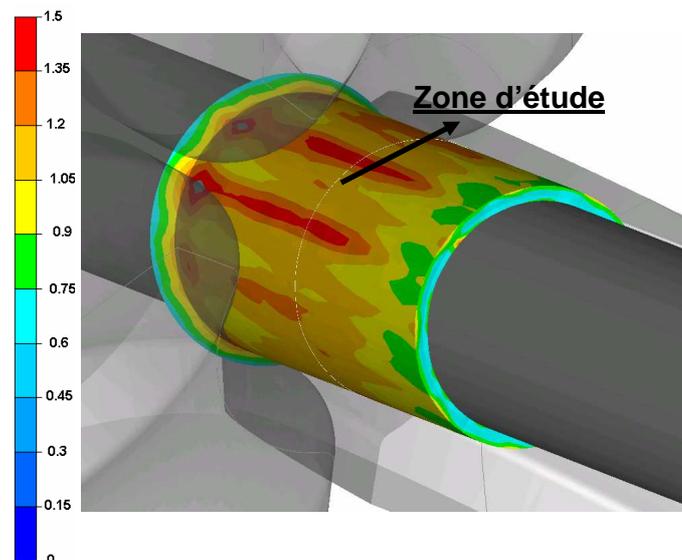


FIG. 4 – Conditions d'analyse de la déformation – un tube court est traité, les effets de bords ne sont pas considérés.

#### 3.1 Le laminage HPTR

Le laminage HPTR du CEA est utilisé pour la réalisation des tubes à l'échelle laboratoire. Ce dispositif est utilisé pour valider la faisabilité des gammes de déformation et de traitement thermique adéquats pour la matière. Des essais interrompus permettent de comprendre l'aspect incrémental du procédé. La simulation numérique du procédé doit tenir compte de la cinématique des outillages, en particulier des galets. Ces galets roulent sur une réglette qui définit la diminution de diamètre extérieur du tube. Les vitesses de la cage à réglettes et de la cage à galets sont imposées par un système de barres/manivelles de manière à imposer un roulement sans glissement entre la réglette et le galet et entre le galet et le tube. On considérera que le déplacement de l'outil s'effectue dans un mouvement de roulement sans glissement par rapport au tube. La cinématique de l'outillage se résume à une translation des galets suivant la trajectoire définie par les

mouvements relatifs de la réglette et du système de bielle. Il faut environ 75 coups de cages pour que la portion de tube considéré soit entièrement laminée. Le temps de calcul d'une telle simulation atteint 140 heures sur 5 processeurs d'un cluster Opteron (AMD64 -264Hz).

La taille de stockage et les quantités d'information nécessitent la mise en place de méthodologie de traitement de l'information. Ainsi, l'histoire thermomécanique d'un point de matière est étudiée par le suivi des grandeurs mécanique représentatives en un capteur numérique lagrangien attaché au point. On relève ainsi par exemple les composantes de déformation plastique cumulée (figure 5) mais aussi les composantes du tenseur des contraintes, la valeur de la triaxialité,...

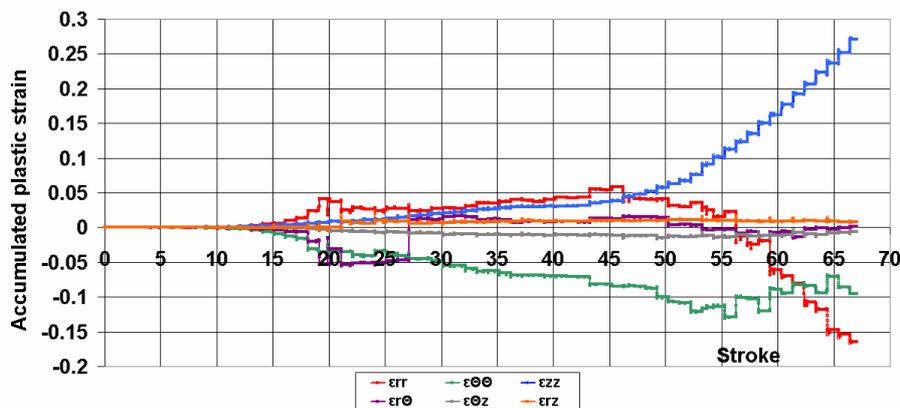


FIG. 5 – Evolution de la déformation plastique cumulée suivant chaque composante.

Une analyse est ensuite conduite pour identifier les situations «endommageantes». C'est à dire où les 3 critères suivants sont réunis à un même instant :

- Triaxialité supérieure à  $-1/3$  [6]
- Contrainte positive (la matière est localement en traction)
- Incrément de déformation positif

On peut ainsi définir un critère d'endommagement basé sur le formalisme de Latham et Cockroft et appliqué dans chaque direction (en coordonnées cylindriques). Ainsi, la valeur de l'endommagement cumulé suivant l'axe de laminage  $z$  est exprimé par :

$$D_{LC-zz} = \sum_{\substack{\text{Stroke} \\ \text{triaxiality} > 1/3}} \sigma_{zz}^* \cdot \Delta \varepsilon_{zz} \quad (4)$$

où  $\sigma_{zz}^* = \max(\sigma_{zz}, 0)$  et  $\Delta \varepsilon_{zz}$  est l'amplitude de déformation dans la direction  $z$ . On obtient ainsi des cartes d'endommagement cumulé dans chaque direction de sollicitation (figure 6).

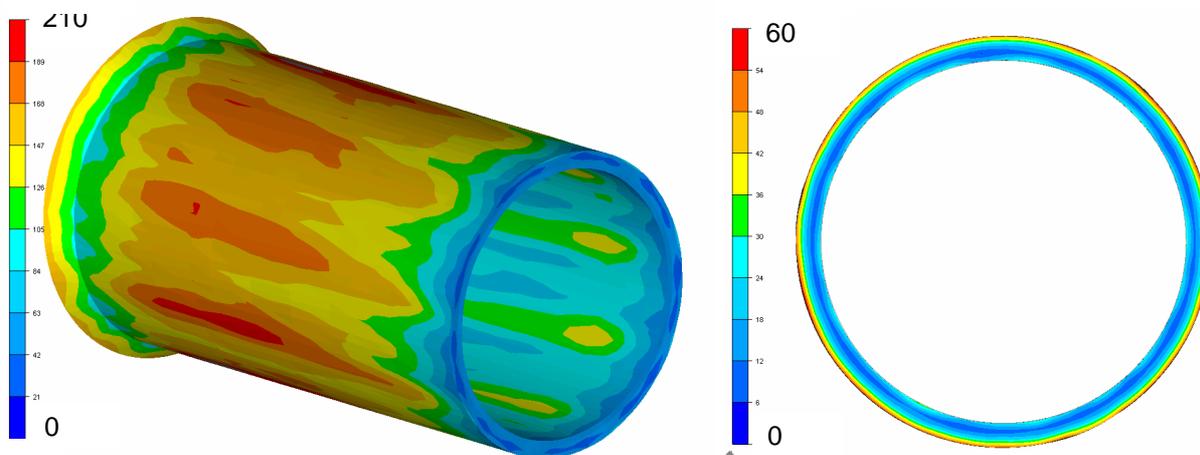


FIG. 6 – Carte d'endommagement suivant direction de laminage (a) et la direction orthoradiale (b).

### 3.2 Le laminage VMR

La société Valinox est leader mondial dans la fabrication de tubes sans soudure pour générateurs de vapeur. Elle dispose de plusieurs laminoirs de type VMR. Afin d'adapter ces outils et gammes de production aux nouveaux matériaux étudiés dans le cadre du projet STRATOTUBE, la mise en place d'une modélisation numérique précise est un outil important. La variation de géométrie des cannelures l'entrée et la sortie de la zone de déformation (essentiellement dans le diamètre de la gorge) oblige à considérer le mouvement de rotation/ translation des cannelures pendant la simulation du procédé contrairement au laminage VMR. Une adaptation du logiciel de calcul est nécessaire pour prendre en compte la rotation des outillages, en particulier la rotation des axes de rotation propres des cannelures d'un coup de cage à l'autre. Le nombre de coups de cage nécessaire pour laminier la longueur du tube est de l'ordre de 140. L'aspect cyclique de la loi de comportement est donc primordial pour ne pas surestimer les valeurs du champ de contrainte et surestimer l'endommagement de la matière.

### Conclusion

La mise au point de gammes de laminage pour des nuances d'aciers renforcés en ODS représente un réel challenge scientifique et économique. Le projet STRATOTUBE a pour but de montrer la faisabilité de cette mise au point en combinant une analyse du procédé par la simulation numérique et l'utilisation d'un laminoir pilote et , une caractérisation fine du matériau dans des conditions de sollicitation proches du laminage. Les travaux présentés ici montrent que la simulation des gammes de fabrication est désormais possible. La simulation numérique et en particulier le module d'optimisation permettent d'exploiter des essais rendus complexes par le faible approvisionnement de la matière pour identifier le comportement des matériaux en condition cyclique. La principale perspective de ce travail est désormais d'introduire les lois de comportement identifiées dans le logiciel afin de pouvoir analyser les gammes de laminage et produire des prototypes à échelle industrielle.

### Remerciements :

Les auteurs remercient Louise Toualbi-Bénévise, Patrick Olier, Denis Sornin, Benjamin Fournier et Yann de Carlan (CEA Saclay DEN/DMN) pour leur support technique et scientifique.

Ces travaux de recherche sont financés dans le cadre du projet ANR STRATOTUBE.

### Références

- [1] Montmitonnet P., Logé R., Hamery M., Chastel Y., Doudoux J-L., Aubin J-L., 3D elastic-plastic finite element simulation of cold pilgering of zircaloy tubes. *J. Mater. Processing Technology*, Vol. 125-126, pp. 814-820, 2002.
- [2] Lodej B., Niang K., Montmitonnet P., Aubin J-L., Accelerated 3D FEM computation of the mechanical history of the metal deformation in cold pilgering of tubes. *J. Mater. Processing Technology* 177, 188-191, 2006.
- [3] Vanegas E., Mocellin K., de Carlan Y., Logé R., Modélisation numérique du laminage à pas de pèlerin et optimisation de la fabrication de tubes ODS, *Matériaux 2010*, Nantes
- [4] Toualbi-Bénévise L., Olier P., de Carlan Y., Bossu D., Rouesne E., Logé R., Rôle des transformations de phase sur l'optimisation de la mise en forme à froid de tubes ODS, *Matériaux 2010*, Nantes
- [5] Chaboche J.L., Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity, *Int. J. Plast* **5**: 247-302, 1989;
- [6] Bao Y, Wierzbicki T On the cut-off value of negative triaxiality for fracture. *Eng.Fract. Mech.* 72:1049-1069, 2005