

# Étude numérique et expérimentale du procédé de fluotournage cylindrique de tubes

M.-A. Vidal<sup>\*a,b</sup>, P.-O. Bouchard<sup>a</sup>, F. Frascati<sup>b</sup>, J.-P. Mallet<sup>b</sup>, F. Fournier<sup>a</sup>,  
A. Pignolet<sup>a</sup>, K. Mocellin<sup>a</sup>

a. CEMEF Mines ParisTech, PSL Research University, CNRS UMR 7635, CS 10207, 06904 Sophia-Antipolis Cedex, France

b. MBDA France, Rond-Point Marcel Hanriot, 18020 Bourges Cedex, France

**Mots clés :** fluotournage ; incrémental ; simulation ; trajet de chargement complexe ; rupture ductile.

## Résumé

*L'industrie aéronautique utilise des tubes produits par fluotournage. Sous l'action de trois molettes, l'épaisseur de la préforme tubulaire est réduite et ses caractéristiques mécaniques sont augmentées par écrouissage. Dans nos travaux, une simulation numérique du fluotournage inverse est réalisée à l'aide du logiciel éléments finis Forge® pour prédire l'endommagement du tube en fonction des paramètres du procédé appliqués. L'analyse du trajet de chargement en simulation le long de l'épaisseur du tube montre des valeurs de déformation et vitesses de déformation particulièrement élevées, une sollicitation cyclique et locale de la matière, associée à un état de contraintes alternant traction et compression. Enfin, des essais réalisés sur un banc de fluotournage à échelle réduite développé au CEMEF ont montré l'apparition de « fish scales », un type de défauts décrit dans la littérature.*

## 1. Introduction

Le fluotournage est un procédé de mise en forme des métaux qui consiste, à partir d'une ébauche tubulaire, à réduire l'épaisseur de la préforme par déformation plastique à froid, locale et répétée. Par conservation du volume, le tube s'allonge. Le fluotournage permet donc de réaliser des tubes sans perte de matière (pas de copeaux) et d'augmenter les caractéristiques mécaniques de la pièce finale par écrouissage. Cependant, mettre au point une gamme de fabrication de pièces par fluotournage coûte cher du fait du prix élevé des préformes et du grand nombre d'essais de mise au point à réaliser pour déterminer les paramètres et les géométries d'outils. Des paramètres du procédé inadaptés conduisent à l'endommagement de la pièce et donc à sa mise au rebut.

Ainsi, simuler numériquement le procédé semble être une solution économique pour tester rapidement les paramètres du procédé à appliquer et voir si ces derniers conduisent ou non à un endommagement du tube. Pour ce faire, la simulation numérique requiert à la fois une loi de comportement du matériau et un critère d'endommagement. Les paramètres de ces lois devront être déterminés expérimentalement pour des trajets de chargement proches de la sollicitation de la matière au cours du fluotournage.

Après une description du procédé de fluotournage et l'introduction du vocabulaire associé, les spécificités de la simulation numérique de ce procédé seront précisées. Une analyse du trajet de chargement de la matière sera menée pour aboutir ensuite à la visualisation de défauts rencontrés au cours du procédé sur des essais expérimentaux réalisés au CEMEF.

## 2. Description du procédé de fluotournage

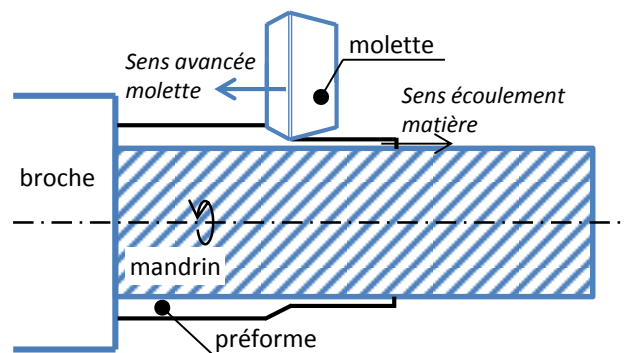
### 2.1. Dispositif

Sur un fluotour, la **préforme** tubulaire est montée sur un **mandrin**, qui est lui-même mis en rotation par la **broche** et qui entraîne le tube. La matière est déformée plastiquement sous l'avance de **molettes** qui se déplacent parallèlement à l'axe de rotation du mandrin ; le fluotour comprend en général trois molettes réparties à 120° les unes par rapport aux autres mais le nombre de molettes peut être variable et dépend du fluotour utilisé.

Il existe deux types de fluotournage cylindrique selon le sens d'écoulement de la matière par rapport au sens d'avance des molettes [1] :

- fluotournage **direct** : la préforme est plaquée entre le mandrin et une contre-pointe (cas où la préforme possède un culot) et la matière s'écoule dans le même sens que l'avancée des molettes ;
- fluotournage **inverse** : la matière est comprimée contre la broche et s'écoule sous les molettes en sens inverse de l'avance de ces dernières (voir figure 1).

Dans le cadre du travail de Depriester [2], un banc de fluotournage instrumenté a été conçu au CEMEF pour du fluotournage inverse. Nous nous concentrerons par conséquent sur le fluotournage inverse dans le reste de cet article.



**Figure 1.** Schéma du fluotournage inverse. Le sens de l'écoulement de la matière est opposé à celui de l'avancée des molettes.

L'objectif du fluotournage étant de réduire l'épaisseur d'une préforme à diamètre intérieur constant, on définit le **taux de réduction** total par l'équation (1) :

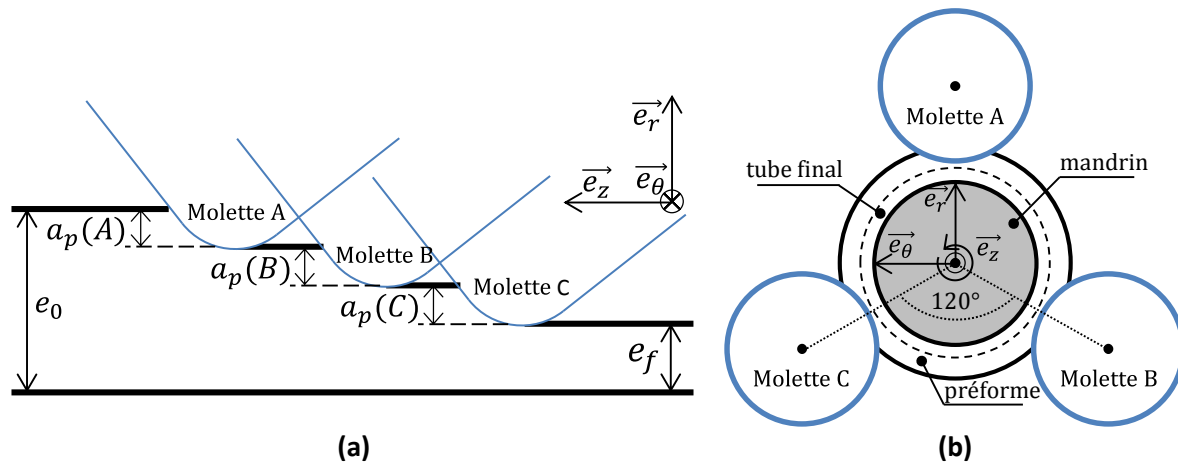
$$\%Tr = \frac{e_0 - e_f}{e_0} \times 100 \quad (1)$$

Où  $e_0$  est l'épaisseur initiale de la préforme (en mm) et  $e_f$  est l'épaisseur finale du tube (en mm). Cependant, le taux de réduction mesuré sur pièce n'est jamais le taux de réduction programmé [2,3]. Il varie en fonction de la matière traitée et des paramètres du procédé. Cordier [3] suggère qu'il provient de trois sources possibles : le cédage du matériau de la molette, le cédage de la machine (jeux dans les roulements etc.), et le retour élastique du matériau fluotourné.

### 2.2. Outillage

Un banc de fluotournage s'organise autour du mandrin sur lequel on viendra monter la préforme tubulaire. Du fait de la géométrie de la pièce, un repère cylindrique  $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$  est utilisé dans la suite. Les molettes, au nombre de trois, sont décalées selon  $\vec{e}_z$  comme indiqué en figure 2(a) si on les représente dans le même plan ; les grandeurs  $a_p(A)$ ,  $a_p(B)$  et  $a_p(C)$  représentent les profondeurs de passes respectives des molettes A, B et C. En pratique, les molettes sont disposées à 120° les unes

des autres (voir figure 2(b)). Comme le mandrin appuie sur les molettes B et C du fait de la gravité, les profondeurs de passes qui leur sont affectées doivent être également ajustées expérimentalement en conséquence pour tenir compte de ce phénomène.



**Figure 2.** (a) Décalage des molettes parallèlement à l'axe de rotation du mandrin et (b) disposition des trois molettes à 120° les unes des autres. Le cercle en pointillé représente l'épaisseur finale du tube.

Deux types de frottement entrent en jeu en fluotournage : le contact mandrin/pièce et le contact pièce/molette. Il est nécessaire de graisser le mandrin avant toute opération afin de pouvoir retirer le tube fluotourné à la fin du procédé ; d'après Houillon, cette lubrification a une influence sur la déformation en torsion de la pièce due à l'effort circonférentiel exercé par les molettes [1]. Au cours du procédé, il est courant de lubrifier l'interface entre la pièce et les molettes, le lubrifiant jouant également un rôle de dissipateur de chaleur [2,4,5].

### 2.3. Paramètres du procédé

Le procédé de fluotournage est piloté par différents paramètres [1] :

- la vitesse d'avance des molettes  $V_f$  (en  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) ;
- la vitesse de rotation du mandrin  $\Omega$  (en  $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$ ) ;
- la profondeur de passe totale  $a_p$  (en mm) répartie entre les trois molettes par  $a_p(A)$ ,  $a_p(B)$  et  $a_p(C)$  en (mm) ;
- le profil de la molette.

Dans leur étude, Davidson, Balasubramanian et Tagore cherchent à fluotourner en configuration une molette une préforme jusqu'à rupture, et ils mesurent le taux d'élongation maximal [6]. Ils ont étudié l'influence des trois premiers paramètres sur le fluotournage de l'aluminium 6061 à l'aide d'un plan de Taguchi. Ils ont alors classé ces trois paramètres du plus significatif au moins significatif : la profondeur de passe, la vitesse de rotation du mandrin puis la vitesse d'avance des molettes. Selon eux :

- une profondeur de passe trop faible conduit à l'écroutissage de la préforme qui rompt avant d'atteindre la longueur désirée car la matière est écrasée seulement en surface, conduisant à des hétérogénéités de dureté entre la surface et l'intérieur du tube. En revanche, une profondeur de passe trop grande engendrerait des contraintes supérieures à la contrainte à rupture du matériau ;
- un juste milieu est nécessaire pour la vitesse de rotation du mandrin : trop faible, la préforme colle aux molettes, trop grande, la structure peut vibrer, l'état de surface du tube s'en trouve alors dégradé. De plus, une trop grande vitesse de rotation induit un

échauffement de la préforme dans la zone de déformation plastique ce qui conduit à des instabilités de déformation puis à la rupture.

Cependant, Davidson, Balasubramanian et Tagore [6] n'étudient pas une éventuelle interaction entre les variables de leur plan de Taguchi, à savoir la profondeur de passe, la vitesse de rotation du mandrin et la vitesse d'avance des molettes.

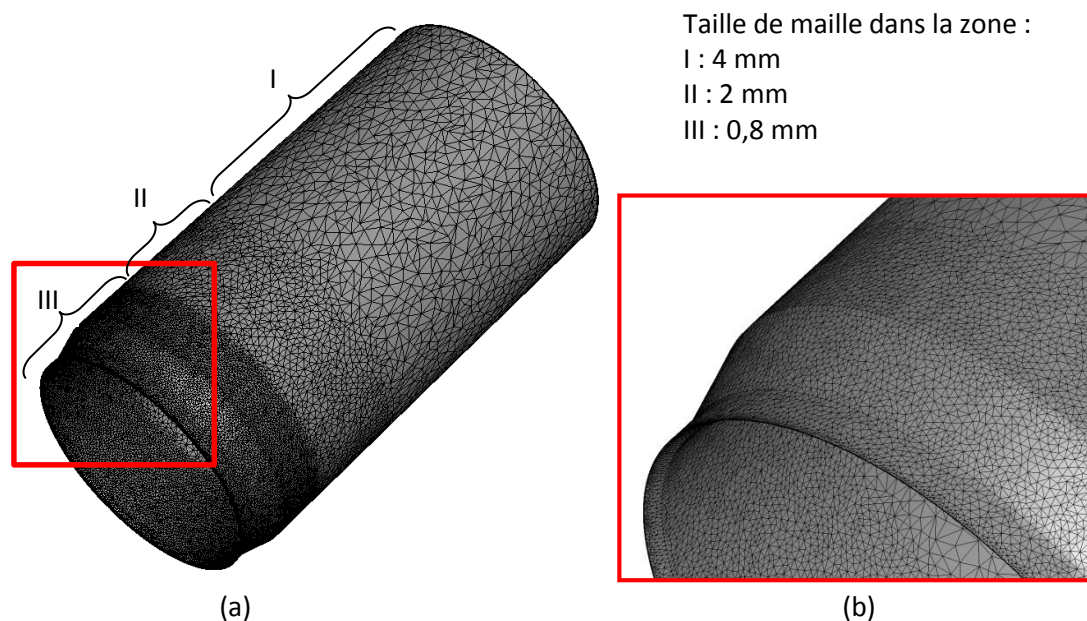
### 3. Simulation numérique du procédé de fluotournage

Les simulations numériques du procédé de fluotournage sont réalisées ici à l'aide du logiciel éléments finis Forge®. Ce logiciel, dédié à la mise en forme des matériaux, est basé sur une formulation vitesse-pression avec des éléments tétraédriques P1+/P1. Il propose une formulation implicite en Lagrangien réactualisé.

Afin d'assurer une meilleure conservation du volume et de réduire le temps de calcul [7], la simulation numérique du procédé de fluotournage de tube considère généralement un système {mandrin + tube} fixe tandis que les molettes tournent autour du tube à la vitesse de rotation du mandrin.

La simulation du procédé de fluotournage reste malgré tout extrêmement coûteuse de par la vitesse de rotation élevée du mandrin et de par les très faibles zones de contact. Le fluotournage est un procédé incrémental car les grandes déformations de la matière sont obtenues par un cumul de déformations locales successives. Les zones de contact entre tube et molettes sont très petites, cela exige un maillage très fin dans ces zones. Un pas de temps très petit est nécessaire compte tenu de la vitesse de rotation du mandrin et de la petite taille des zones de contact. Le maillage est par conséquent un élément clé de la simulation. Il doit être particulièrement fin dans l'épaisseur du tube et dans les zones de contact mais pas trop fin pour ne pas pénaliser le temps de calcul.

Par exemple, un maillage trop grossier ne permettrait pas à la matière d'épouser la forme de la molette dans la matière de manière précise. Le maillage d'un tube de 92 mm de diamètre interne, de 195 mm de longueur, et de 5 mm d'épaisseur est illustré en figure 3 :

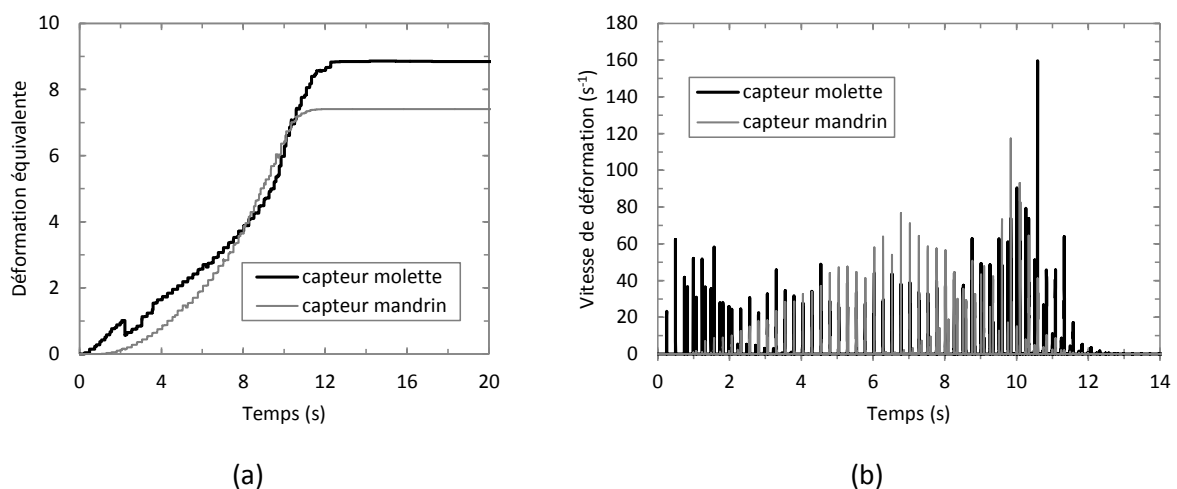


**Figure 3.** (a) maillage global du tube et (b) zoom sur la zone maillée le plus finement. Dans la zone I, il y a environ 6 mailles dans l'épaisseur du tube.

Des simulations ont été réalisées en ne raffinant qu'une tranche de tube plutôt que l'intégralité de la circonférence afin d'écourter le temps de calcul. Cependant, plus la largeur de la zone raffinée était faible, plus les résultats s'écartaient de ceux d'une simulation dont l'intégralité de la circonférence avait été maillée finement.

#### 4. Analyse du trajet de chargement subi par la matière

Afin de connaître le trajet de chargement subi par la matière au cours du fluotournage, deux capteurs, qui suivent l'écoulement de la matière, sont placés dans l'épaisseur du tube. L'un est en peau externe au plus près des molettes, et l'autre en peau interne au plus près du mandrin. La configuration de fluotournage étudiée correspond à une passe à trois molettes à 75 % de taux de réduction pour une préforme d'épaisseur initiale 5 mm, en alliage d'aluminium 6061 (la loi de comportement provient de la base de données de Forge®). Le mandrin tourne à une vitesse de 242 tr/min et les molettes avancent à une vitesse de 60 mm/min.



**Figure 4.** (a) déformation plastique équivalente (accumulée) en fonction du temps et (b) vitesse de déformation équivalente au cours du temps, relevées au capteur proche de la molette et au capteur proche du mandrin pendant une simulation de fluotournage.

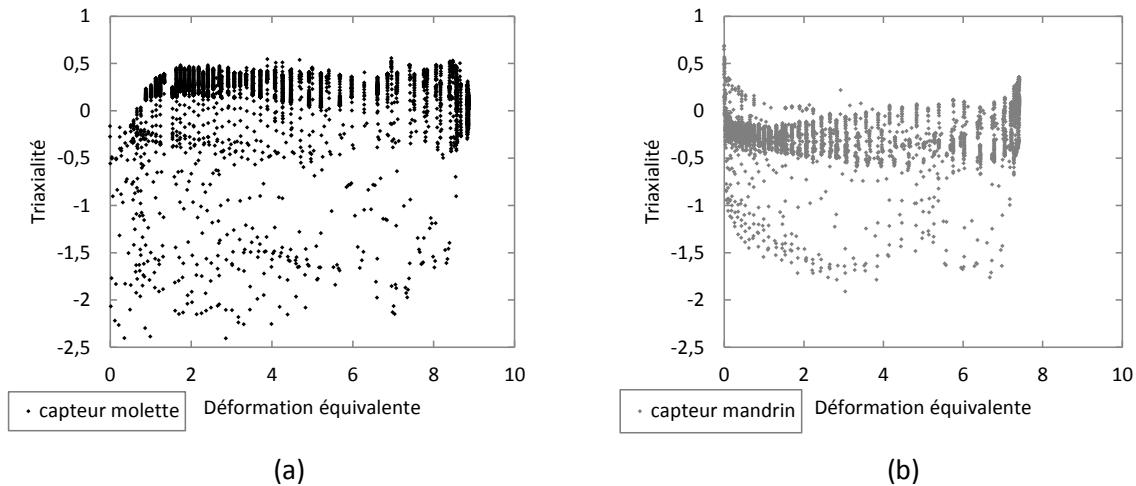
La figure 4(a) représente l'évolution de la déformation équivalente au cours du temps. On se rend compte des valeurs extrêmes de déformations atteintes au cours du procédé. On remarque de plus que la matière située proche de la molette est plus déformée que la matière située proche du mandrin. Le plateau observé à partir d'environ 12 s signifie que les molettes sont toutes les trois passées au-delà des capteurs et ne déforment plus la matière associée à ces derniers.

Sur la figure 4(b), les valeurs de vitesses de déformation ont été relevées en fonction du temps. Du fait de la cinématique des outils, la matière subit des incréments de déformations de manière locale et rapide comme on le voit ici. Chaque pic de vitesse de déformation est associé au passage d'une des trois molettes au-dessus du capteur lié à la matière. On voit bien que les pics se superposent pour les deux capteurs, c'est-à-dire que lors d'un passage de molette, la matière est déformée en même temps le long de l'épaisseur du tube. Le caractère cyclique du trajet de chargement est également rapporté par la figure 4(b).

Connaître les valeurs de déformation et de vitesses de déformation subies par la matière est nécessaire pour orienter le choix des essais de caractérisation du comportement. Néanmoins, l'état de contraintes de la matière doit également être le plus fidèlement reproduit afin de nous intéresser à la prédiction de l'endommagement ductile. Or, la figure 5 montre que l'état de contraintes de la matière lors du fluotournage est différent le long de l'épaisseur du tube. Cette figure illustre

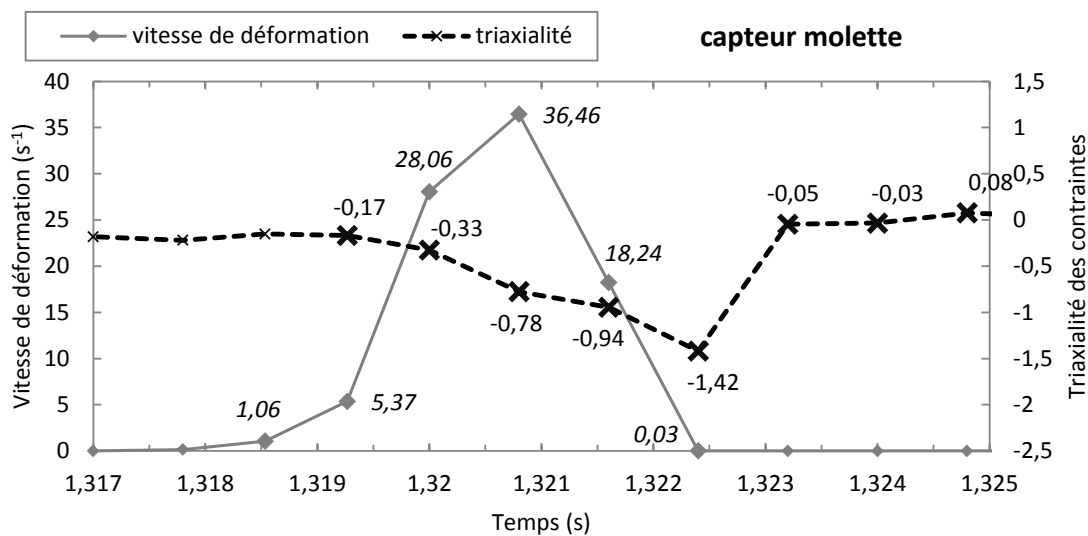
l'évolution du taux de triaxialité des contraintes en fonction de la déformation équivalente pour les deux capteurs. On se rend ainsi compte que la matière située en surface externe, proche des molettes, a un état de contraintes alternant les sollicitations en traction (triaxialité positive) et en compression (triaxialité négative) tandis que la matière située en surface interne est majoritairement sollicitée en compression (avec cependant quelques cycles en traction).

Les différentes sollicitations de la matière pendant le fluotournage vont conduire à différents types de défauts observables lors de la mise en forme.



**Figure 5.** Triaxialité des contraintes en fonction de la déformation équivalente (a) au capteur le plus proche des molettes et (b) au capteur le plus proche du mandrin. Les valeurs de triaxialité sont filtrées pour des valeurs de vitesses de déformation correspondantes supérieures à  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

En regardant plus précisément l'évolution de la vitesse de déformation et de la triaxialité des contraintes au cours du temps (figure 6), on remarque que durant le passage de la molette, et donc pour des vitesses de déformations élevées, l'état de contraintes est très compressif avec des valeurs de triaxialité très basses. On considère généralement qu'un état de contraintes associé à une triaxialité inférieure à  $-1/3$  n'endommage pas le matériau. Cela explique pourquoi il est possible d'aboutir à des valeurs de déformations très élevées telles que celles vues en figure 4(a), à cause du cumul de déformations successives qui n'ont pas entraîné d'endommagement.

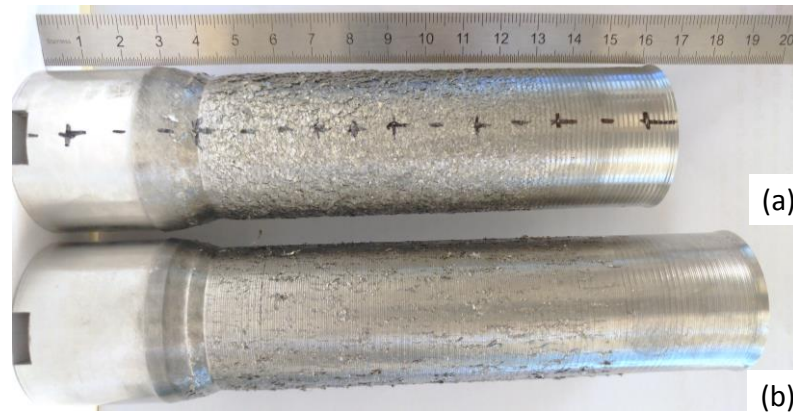


**Figure 6.** Évolution de la vitesse de déformation et de la triaxialité des contraintes au cours d'un unique passage de molette sur le capteur le plus proche des molettes

## 5. Les défauts rencontrés en fluotournage

Des essais réalisés au CEMEF sur le banc expérimental de fluotournage ont mis en évidence quelques types de défauts.

Le tube en aluminium 6061 (figure 7(a)) a été fluotourné à 60 % de taux de réduction. On parle de paillettes ou de « fish scales » pour décrire son état de surface. Ce type de défaut a été rapporté par Rajan et Narasimhan [8] et par Houillon [5] qui considèrent que c'est le bourrelet de matière en amont de la molette qui se détache et qui est recollé sur la pièce au passage d'une molette. Ce phénomène est également décrit par Gur et Tirosh [9] qui l'appellent « plastic flow instability ». L'apparition de ce défaut est due au dépassement d'une valeur critique de l'angle d'attaque de la molette. Pour l'éviter, les auteurs proposent de diminuer l'angle d'attaque des molettes, d'augmenter le taux de réduction ou bien de diminuer l'avance par tour des molettes. La figure 7(b) présente un tube en aluminium 6061 également fluotourné à 60 % de taux de réduction mais avec une avance par tour de 0,2 mm/tr au lieu de 0,6 mm/tr pour le tube présenté en figure 7(a). La surface du tube fluotourné moins vite est moins endommagée mais il présente encore quelques paillettes. Il sera donc intéressant de mener d'autres essais en faisant varier les autres paramètres mentionnés par Gur et Tirosh [9].



**Figure 7.** Tubes en aluminium 6061 fluotournés à 60 % de taux de réduction (a) à 0,6 mm/tr et 100 tr/min et (b) à 0,2 mm/tr et 50 tr/min.

## 6. Conclusion

Le fluotournage est un procédé de mise en forme de tubes métalliques dont la cinématique des outils rend la simulation numérique du procédé complexe. Un maillage fin est requis afin d'obtenir des résultats avec une précision satisfaisante mais en contrepartie, le temps de calcul est très long (plusieurs jours). Aussi, il est nécessaire de trouver un compromis entre précision des résultats et temps de calcul, ce qui aura un impact direct sur la finesse du maillage choisi. D'autres méthodes de simulation sont à l'étude afin de réduire le temps de calcul, notamment réduire la simulation à deux dimensions.

De plus, la cinématique des outils a pour conséquence une sollicitation cyclique et locale de la matière avec une triaxialité des contraintes majoritairement négatives permettant ainsi d'atteindre des valeurs de déformations équivalentes particulièrement élevées. Malgré cela, les études trouvées dans la littérature sur la modélisation de ce procédé font souvent appel à des lois de comportement identifiées à l'aide d'essais de traction et par conséquent pour des niveaux de déformation bien en deçà de ceux atteints lors du fluotournage. Ces articles ne tiennent pas compte non plus du caractère cyclique du chargement subi par la matière.

Enfin l'analyse du champ de contrainte montre que la matière subit un état de compression radial et orthoradial et un état d'élongation axiale au cours des passages de molettes. L'analyse de l'endommagement ductile pour ce type de procédé devra donc tenir compte de la particularité de cet état de contrainte associé au caractère incrémental du chargement.

Toutes ces informations seront à prendre en compte dans la suite de notre étude lors du choix des essais de caractérisation nécessaires à la détermination des paramètres des lois de comportement et critère d'endommagement pour la simulation du fluotournage et la validation de nos modèles sur des essais. À cet effet, le banc de fluotournage du CEMEF a été amélioré pour permettre des configurations proches du procédé industriel.

## Références

- [1] M. Houillon. Fluotournage. In : *Techniques de l'ingénieur : Mécanique | Travail des matériaux – Assemblage*, vol. BM 7580. Paris : Techniques de l'ingénieur, 2010, pp. 1-15
- [2] D. Depriester, Caractérisation et modélisation du procédé de fluotournage inverse à froid du TA6V, Thèse, École des Mines de Paris, 2014
- [3] M. Cordier. Étude du fluotournage. Document interne à l'entreprise MBDA France, 2017, 60 p. Disponible sur demande
- [4] A. D'Annibale, A. Di Ilio, A. Paoletti, D. Paoletti, S. Sfarra. The combination of advanced tools for parameters investigation and tools maintenance in flow forming process, *Procedia CIRP*, 59 (2017) 144-149.
- [5] M. Houillon, Modélisation du procédé de fluotournage du tantale et du traitement thermique associé, Thèse, École des Mines de Paris, 2009
- [6] M. J. Davidson, K. Balasubramanian, G.R.N. Tagore, Experimental investigation on flow-forming of AA6061 alloy - A Taguchi approach, *Journal of Materials Processing Technology*, 200 (2008) 283-287
- [7] C.C. Wong, T.A. Dean, J. Lin, Incremental forming of solid cylindrical components using flow forming principles, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154 (2004) 60-66
- [8] K. M. Rajan, K. Narasimhan, An Investigation of the Development of Defects During Flow Forming of High Strength Thin Wall Steel Tubes, *Practical Failure Analysis*, 1 (2001) 69-76
- [9] M. Gur, J. Tirosh, Plastic Flow Instability Under Compressive Loading During Shear Spinning Process. *Journal of Engineering for Industry*, 104 (1982) 17-22