

---

# Nouveau Procédé d'Hyper-Déformations De Tubes Par Torsion

**Roxane Arruffat\*, Jean-Jacques Fundenberger\***

*\* IUT– Université Paul Verlaine  
Département Génie Mécanique et Productique  
Ile du Saulcy 57045 METZ*

*arruffat@univ-metz.fr ; jean-jacques.fundenberger@univ-metz.fr.*

**Sections de rattachement : 60, 28**

**Secteur : Secondaire**

*RÉSUMÉ. Un nouveau procédé est proposé afin de déformer des tubes cylindriques sous de très grandes déformations plastiques sans modifier leurs dimensions. Une pression hydrostatique est obtenue par compression axiale d'un mandrin cylindrique placé dans le tube. Le tube est ainsi déformé par torsion par un couple à l'aide de la force de frottement générée par la pression hydrostatique. Cette nouvelle technique d'hyper-déformations plastiques semble être très prometteuse pour de futures applications industrielles.*

*MOTS-CLÉS : Très grandes déformations plastiques, tubes, torsion, cisaillement simple, Al, Cu.*

## **1. Introduction**

Il y a un grand intérêt ces dernières années pour les très grandes déformations plastiques ou hyper-déformations (Severe Plastic Deformation en anglais) afin d'améliorer les propriétés des matériaux. Depuis 1974, plusieurs nouveaux procédés d'hyper-déformations ont été proposés; les plus communément employés sont:

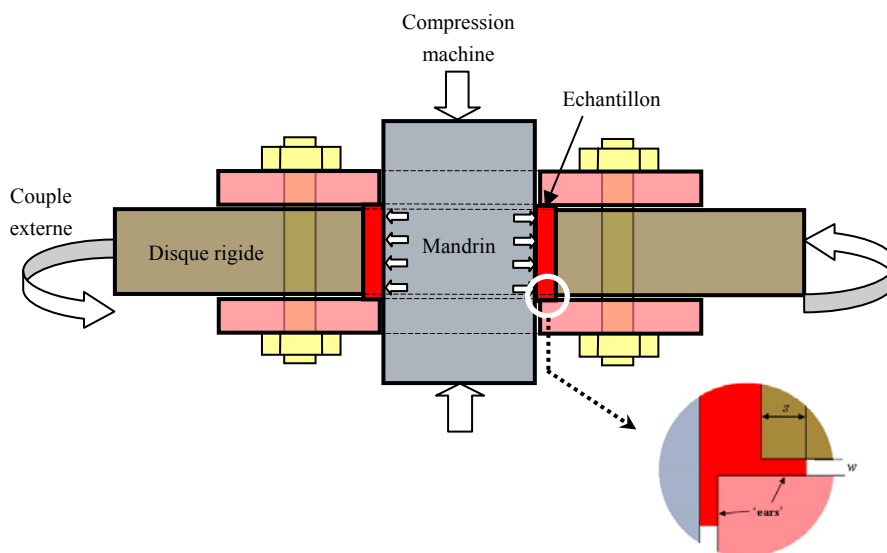
- Equal Channel Angular Extrusion (ECAE (Segal 1974, Segal 1999)),
- High Pressure Torsion (HPT (Languillaume 1993)),
- Accumulated Roll Bonding (ARB (Saito 1999)).

ECAP et ARB sont des processus qui requièrent plusieurs passages dans le dispositif afin d'obtenir de grandes déformations. Le HPT se distingue des autres procédés car ses déformations sont pratiquement illimitées suite une seule passe. Mais son inconvénient

est que les échantillons sont de petits disques avec un gradient de déformations linéaire. Dans un article très récent (Bouaziz et al. 2007), les auteurs ont proposé une modification du procédé HPT, appelée Cone-Cone Shearing (CCS) où l'échantillon a une forme conique. L'avantage du dispositif proposé est que la déformation est plus uniforme (selon leur analyse par éléments finis). Cette technique, cependant, n'a pas encore été testée expérimentalement..

## 2. Principe du procédé HPTT

Dans le travail actuel, on propose un nouveau procédé d'hyper-déformations adapté aux tubes à parois minces afin d'obtenir de très grandes déformations en une seule opération. Le processus a été appelé très récemment: HPTT, signifiant 'High Pressure Tube Twisting', c'est à dire torsion de tubes sous haute pression. Le montage expérimental est présenté schématiquement sur la figure 1. L'échantillon (un tube) est introduit à l'intérieur d'un disque rigide. Un mandrin, placé dans le tube, est comprimé par une machine de compression. En raison de la compression axiale du mandrin, il y a une légère expansion dans la direction radiale. Celle-ci, cependant, est contenue par le tube et le disque. Par conséquent, une contrainte hydrostatique importante s'accumule dans le tube. Cette dernière fournit une grande force de frottement sur les deux côtés de l'échantillon testé. Finalement, la déformation du tube est réalisée en tournant le disque avec un couple externe tandis que le mandrin est maintenu fixe.



**Figure 1** . Schéma du test HPTT sous pression hydrostatique. La partie encerclée montre l'écoulement de matière dans l'échantillon et est appelée "oreille" ou "ears"

Les caractéristiques obtenues sont les suivantes: le tube est légèrement plus long dans l'épaisseur du disque et comprimé plastiquement à l'aide de deux disques et des vis appropriées avant l'application de la force axiale (voir Fig. 1). En raison de cette compression, il y a un écoulement de la matière du tube comme montré sur la figure 1, tout autour des extrémités supérieure et inférieure du tube. Le but de cette opération est double :

- le tube est parfaitement contraint,
- les "oreilles" produites de cette façon contiennent l'échantillon dans un volume constant et assurent un gradient important par la pression hydrostatique dans les oreilles.

### 3. Analyse du nouveau procédé

Pendant la torsion, le mode de déformation est localement du cisaillement simple où le plan de cisaillement est normal à la direction radiale du tube et la direction de cisaillement est parallèle au rayon du disque. Pour un tube à parois minces, la quantité de cisaillement peut être estimée à partir de la géométrie comme suit:

$$\gamma = \frac{r_0 \beta}{t} \quad [1]$$

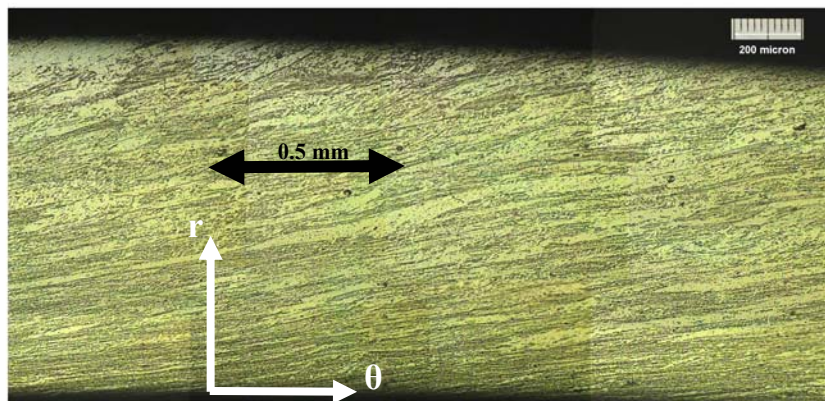
où  $r_0$  est le rayon moyen du tube,  $\beta$  est l'angle de la torsion et  $t$  est l'épaisseur du tube. Par exemple, pour une géométrie où  $r_0=10$  mm et  $t=1$ mm, une rotation de  $360^\circ$  donne  $\gamma \approx 63$ . C'est une déformation extrêmement grande qui peut mener à un processus de raffinement du grain très efficace. La déformation, en principe, est illimitée, car la torsion peut être augmentée sans limite en supposant qu'il n'y ait aucun glissement entre l'échantillon et le mandrin. Dans ce cas, le procédé est semblable à celui de HPT, cependant, l'échantillon peut être beaucoup plus grand. Ses dimensions sont seulement limitées par la capacité de la machine de compression et le couple de torsion requis. La géométrie est également plus intéressante que dans le cas du HPT car les tubes sont très fréquemment utilisés dans des applications pratiques. Les hyper-déformations mènent à des tailles de grains submicroniques ou presque nanométriques permettant ainsi le durcissement du matériau. Il a été mesuré (Dubravina et al, 2004) une dureté Vickers correspondant à 1500 MPa après un essai en HPT sur du cuivre pur avec une taille de grain moyenne de 70 nm. Des matériaux plus performants permettent de diminuer l'épaisseur du tube (sous conditions de charge équivalentes) menant à la réduction significative de la matière utilisée et du poids de la structure.

La contrainte hydrostatique obtenue par la compression des jeux du mandrin joue un rôle central dans notre nouveau procédé HPTT. Son importance peut être estimée à partir des "oreilles" formées au dessus et en dessous de la surface du tube (voir sur la figure 1). En supposant que la force de frottement  $\tau_f$  est égale à la contrainte d'écoulement de la matière en cisaillement (loi de Tresca) et en employant la méthode

des tranches en plasticité, la formule suivante peut être obtenue pour la pression hydrostatique  $p$  dans l'échantillon:

$$p = 2\tau_f \frac{s}{w} \quad [2]$$

Ici  $s$  est la longueur de "l'oreille" et  $w$  est son épaisseur. Dans nos expériences, nous avons mesuré les valeurs suivantes pour la torsion de tube de cuivre pur :  $s \approx 0,5$  mm et  $t \approx 0,1$  mm. Ainsi, pour un matériau qui durcit jusqu'à  $\tau_f = 200$ MPa, la pression hydrostatique estimée peut atteindre  $p \approx 2$ GPa. Cette pression est assez grande pour produire une force de frottement nécessaire pour la torsion du tube. Néanmoins, pour augmenter le frottement, les surfaces intérieure et extérieure du tube, tout comme les autres surfaces en contact avec ces dernières pendant l'essai, ont été sablées avant le test.



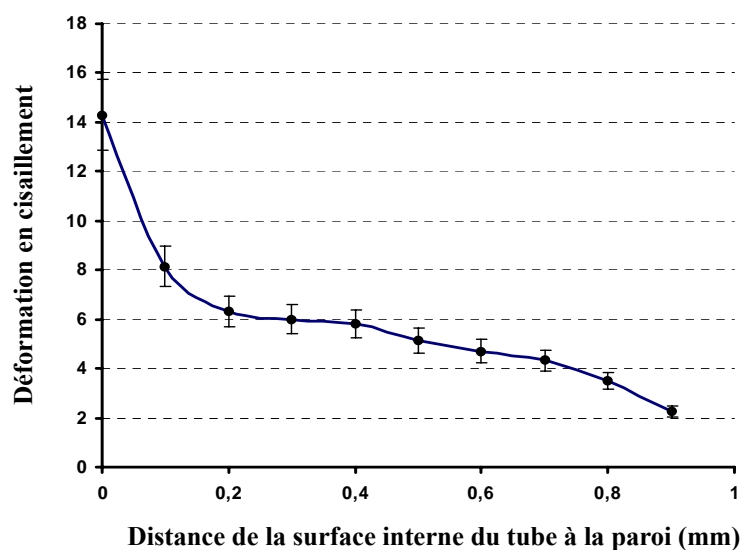
**Figure 2 .** *Echantillon de tube d'aluminium hyper-déformé.*

Dans les premiers essais, des tubes de cuivre et d'aluminium "commercialement" pur ont été examinés. Pour les deux cas, le diamètre intérieur des tubes était de 20 mm, l'épaisseur de la paroi était 1 mm et la hauteur des échantillons était de 11 mm. La force de compression appliquée sur le mandrin était de 200 kN. Le couple de torsion  $T$  a été appliqué manuellement avec l'aide de deux barres attachées au disque principal et sa valeur n'a pas été mesurée. Néanmoins, celle-ci peut être calculée à partir la géométrie et la contrainte d'écoulement en cisaillement de la matière. Par exemple, pour  $\tau_f = 200$ MPa,  $T$  égal à 1256Nm. C'est une valeur typique pour le cuivre pur fortement déformé. Pour l'aluminium, le couple est beaucoup moins important, de sorte que l'essai puisse être plus facilement réaliser à la main. La figure 2 montre une image métallographique de l'échantillon d'aluminium déformé. Comme on peut le voir sur la

structure déformée des grains, la déformation plastique s'est entièrement étendue à toute l'épaisseur du tube d'aluminium. L'angle de torsion était de  $30^\circ$  dans cette expérience après quoi l'essai a dû être arrêté en raison de la limite atteinte pour le couple appliqué à la main. La déformation en cisaillement obtenue à partir de l'équation 1 (en supposant le cisaillement uniforme) est  $\gamma = 6.02$ . Cependant, comme on peut le voir sur la figure 2, la déformation en cisaillement n'est pas uniforme. Afin de mesurer le gradient de déformation obtenu dans le tube, la déformation en cisaillement a été mesurée en fonction de la distance à la surface intérieure du tube. La structure du grain initial était globulaire avec une taille de grain moyenne d'environ  $50\mu\text{m}$ . Après le cisaillement, les grains sont devenus de forme ellipsoïdale et la déformation en cisaillement peut être obtenue comme suit, à partir de l'orientation  $\alpha$  de leurs axes principaux tout en respectant la direction  $\theta$  (Canova et al. 1984):

$$\gamma = \frac{2}{\tan(2\alpha)} \quad [3]$$

L'angle  $\alpha$  peut être aisément mesuré à partir des micrographies car la déformation en cisaillement est grande, ainsi  $\alpha$  est bien en accord avec l'orientation des inclusions constituées par les frontières des grains, voir Fig. 2. La déformation en cisaillement ainsi obtenue est tracée sur la figure 3 en fonction de la position par rapport à la paroi du tube.



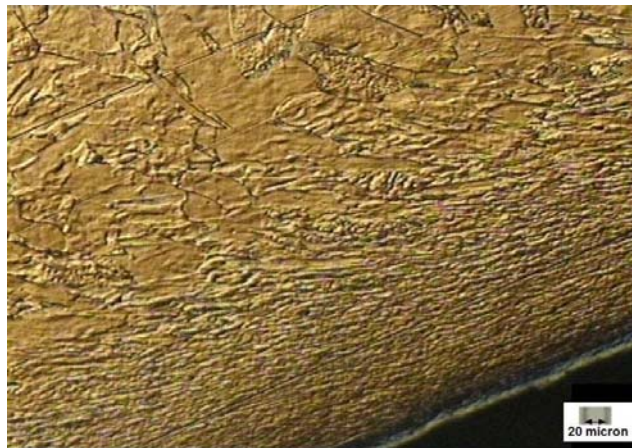
**Figure 3 .** Variation de la déformation en cisaillement dans un tube d'aluminium déformé par le nouveau procédé HPTT.

Comme on peut le voir sur le graphe de la figure 3, la déformation en cisaillement varie de  $\gamma = 14$  sur la surface interne à  $\gamma = 2$  sur la surface externe. La valeur moyenne est d'environ 6 ce qui est conforme aux résultats calculés précédemment pour un cisaillement uniforme. Il reste une autre condition qui doit être accomplie, c'est la validation entre la rotation  $\beta$  du disque externe et la distribution de déformation en cisaillement dans le tube. À partir des bases de la cinématique, on peut aisément obtenir la relation suivante :

$$\beta = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma(r)}{r} dr \quad (4)$$

Ici  $r_1$  et  $r_2$  sont respectivement les rayons intérieur et extérieur du tube. En fait, l'intégration de la déformation en cisaillement présentée sur la figure 2 est en accord avec l'angle appliqué de  $30^\circ$  de rotation. Cet accord signifie également qu'il n'y a aucun glissement entre le tube et le dispositif d'essai.

En fait, la déformation en cisaillement ne doit pas être constante dans la paroi du tube. Bien que conditions aux limites pour les déplacements qui sont appliqués sur les surfaces intérieure et extérieure correspondent bien au cisaillement simple (pour un tube à parois minces), cela ne signifie pas que le cisaillement doit être constant dans la zone plastique déformée. Le cisaillement pourrait même être concentré dans une seule zone; dans une bande de cisaillement. De telles instabilités peuvent se développer selon les conditions de la géométrie de l'essai mais également selon le comportement du matériau. Un cas où de telles bandes de cisaillement ont observé en ECAE – qui est également un procédé de cisaillement simple - a été modélisé avec succès dans la référence (Lapovok et al. 2009).



**Figure 4** . Tube de cuivre commercialement pur déformé par HPTT. L'image métallographique est donnée dans la section  $r-\theta$  du tube, la surface intérieure de la paroi du tube est visible

Le gradient de déformation obtenu dans l'échantillon d'aluminium conduit à un gradient des propriétés du matériau dans l'épaisseur de tube. Néanmoins, comme la déformation en cisaillement est pratiquement illimitée (avec l'outil approprié), les propriétés des matériaux pourraient être homogénéisées de sorte qu'elles correspondent à un état où la saturation se produit en hyper-déformations. Cette proposition a naturellement besoin davantage de validation expérimentale.

Une tentative a été également faite d'appliquer le procédé HPTT sur un tube de cuivre "commerciallement" pur. Pour le cuivre, cependant, notre dispositif expérimental n'est pas totalement approprié car un glissement s'est produit entre le mandrin et le tube. Néanmoins, la couche intérieure de la surface a été fortement déformée aux environs 170  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, voir fig. 4.

#### **4. Conclusions et perspectives**

En conclusion, le nouveau procédé d'hyper-déformations présenté convient pour déformer des tubes à parois minces pour de très grandes déformations. Des échantillons d'aluminium et de cuivre ont été déformés avec plastification complète pour l'échantillon d'aluminium et sur une couche de surface dans le tube de cuivre. Une analyse de la déformation en cisaillement dans le tube d'aluminium a été également effectuée montrant un gradient de cisaillement dans l'épaisseur du tube. D'autres expériences sont nécessaires pour une meilleure compréhension du procédé et pour développer des installations expérimentales appropriées à la déformation des matériaux plus durs.

#### **Bibliographie**

Bouaziz O., Estrin Y., Kim H.S., Revue de Metallurgie-Cahiers d'Informations Techniques, vol. 104, 2007, p. 318.

Canova G.R., Kocks U.F., Jonas J.J., Acta Metallurgica, vol. 32, 1984, p. 211.

Dubravina A., Zehetbauer M.J., Schafner E., Alexandrov I.V., Materials Science and Engineering A, vol. 387-389, 2004, p. 817.

Languillaume J., Chmelik F., Kapelski G., Bordeaux F., Nazarov A.A., Cavova G.R., Esling C., Valiev R.Z., Baudelet B., Acta Metal. Mater., vol. 41, 1993, p. 2953.

Lapovok R., Tóth L.S., Molinari A., Estrin Y., J. Mech. Phys. Solids, vol. 57, 2009, p. 122-136.

Segal V.M., Ph.D. Thesis, Minsk, Russia, 1974.

Segal V.M., Mater. Sci. Eng., vol. A271, 1999, p. 322.

Saito Y., Utsunomiya H., Tsuji N., Sakai T., Acta Mater., vol. 47, 1999, p. 579.