

Développement du procédé de micro hydroformage de tubes

Y. Lu^{a,b}, S. THIBAUD^{a,b}, N. BOUDEAU^{a,c}, P. MALECOT^{a,c}

a. Laboratoire FEMTO-ST, Département Méc'Appli, 24 rue de l'épitaque 25000 Besançon

b. Université de Franche-Comté – UFR Sciences et Techniques, 16 route de Gray, 25030 Besançon

c. Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques, 26 rue de l'épitaque, 25000 Besançon

Résumé :

Ce papier présente les travaux réalisés sur la miniaturisation du procédé de microhydroformage de tubes et plus particulièrement sur le test de gonflement en cavité ouverte. La conception et dimensionnement d'un dispositif expérimental dédié sont basés sur une approche numérique (calculs par éléments finis) du procédé. La miniaturisation du test de gonflement permet en corrélation avec un modèle analytique permet de déterminer l'évolution du comportement mécanique du matériau et des caractéristiques géométriques du tube. De par cette approche, on montrera la possibilité de faire varier certains paramètres (diamètre de tube, épaisseur et microstructure) pour déterminer leur influence sur le comportement (effet d'échelle). Ces résultats donneront ainsi accès à une modélisation plus fine du comportement mécanique des tubes en faibles dimensions dans des conditions proches du procédé, l'objectif étant de pouvoir développer et maîtriser le procédé de micro-hydroformage.

Abstract :

The paper presents works done on the miniaturization of the tube hydroforming process and more precisely on the free bulging test. The design and gauging of the experimental set-up is based on finite element simulations. The miniaturization of the bulge test in correlation with an analytical model permits to determine the evolution of the mechanical behavior of the material and of the tube geometrical characteristics. Within this approach, it is shown the possibility to determine the scale effects on the mechanical behavior by varying some parameters such as tube diameter, tube thickness and microstructure. The future results will permit a finer modeling of the mechanical behavior of micro tubes under conditions close to the process. The final goal is to develop and control the tube micro hydroforming process.

Mots clefs : micro tubes, gonflement libre, micro hydroformage, miniaturisation, effets d'échelle

1 Introduction

Le procédé d'hydroformage est maintenant considéré comme une technique avancée. Il possède plusieurs avantages tels que 1) l'obtention de pièces monoblocs (ou minimisant les procédés de jonctions) augmentant la rigidité et la résistance des structures 2) une diminution des outillages et des opérations secondaires (cintrage, jonctions, mise en conformité) 3) une réduction du poids des composants par un contrôle optimal du formage 4) une influence plus réduite de certains défauts (retour élastique) amenant à une plus grande maîtrise dimensionnelle des composants formés.

De nos jours, la tendance est à l'intégration de fonctions de plus en plus complexes dans des composants de plus en plus petits. Il est donc important de proposer des solutions quant à la miniaturisation et la réalisation de ceux-ci. On tend ainsi à reproduire les procédés de fabrication classiques à de plus petites dimensions [1].

Néanmoins cette réduction d'échelle n'est pas caduque. L'effet le plus énoncé de la littérature [2] sur la miniaturisation est l'augmentation de limite d'élasticité avec la taille de grain (effet Hall et Petch). Les théories classiques de la plasticité ne contenant aucune longueur caractéristique du matériau (par exemple la taille de la microstructure), ces effets ne sont pas pris en considérations. Un des objectifs du développement expérimental du gonflement libre de tubes en faibles dimensions est de mettre en évidence les effets de la miniaturisation et de s'orienter vers des modèles de comportement plus évolués (modèles à gradient de plasticité).

2 Simulations numériques

Les simulations présentées dans ce paragraphe vont permettre d'estimer certaines grandeurs essentielles pour la conception du dispositif expérimental dédié à la caractérisation mécanique des micro-tubes dont les principales caractéristiques géométriques sont rappelées au tableau 1.

Demi-longueur libre de gonflement	6 – 12 mm
Diamètre	2,5 – 5 mm
Epaisseur	0,05 – 0,25 mm
Rapport diamètre/épaisseur	25 – 50 - 100

TAB. 1 – Les dimensions typiques des micro tubes.

2.1 Considérations générales

Afin de mener des simulations éléments finis du test de gonflement libre de micro tubes, des hypothèses, fondées sur des travaux expérimentaux réalisés sur des macros tubes [3], sont faites : 1) le tube est fixé à l'outillage à ses deux extrémités 2) le tube ne peut se gonfler que dans sa partie centrale appelée zone de gonflement libre.

De ce fait, le test présente une double symétrie : une symétrie cylindrique et une symétrie miroir. A la figure 2, seule la symétrie miroir est considérée.

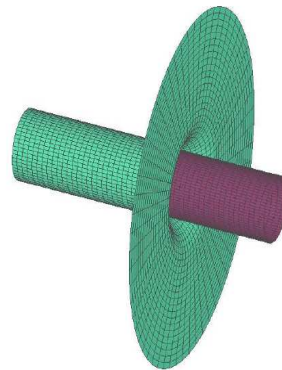


FIG. 2 – Modèle éléments finis utilisé pour la simulation du gonflement des micros tubes.

Les simulations numériques sont menées à l'aide du logiciel LS-Dyna® utilisant un algorithme dynamique explicite. Les géométries du tube et de la matrice sont maillées avec des éléments finis totalement intégrés de type coque Belytschko - Tsai d'une taille moyenne de 0,025 mm. Le frottement entre le tube et la matrice est modélisée avec une loi de Coulomb avec un coefficient de frottement de 0,1. Le matériau est considéré isotrope sans effet viscoplastique ; son comportement plastique est représenté par une loi d'écrouissage de type puissance :

$$\sigma_0(\bar{\epsilon}^p) = \sigma_Y + K \cdot (\bar{\epsilon}^p)^n \quad (1)$$

Où $\bar{\epsilon}^p$ est la déformation plastique équivalente, σ_Y la contrainte limite d'élasticité, K la consistance et n l'exposant représentant l'écrouissage du matériau.

A ce niveau de l'étude, c'est le critère de plasticité de von Mises qui est considéré. Pour mener les simulations éléments finis, on utilise les paramètres listés au tableau 2.

Masse volumique	7 800 kg/mm ³
Module d'Young	210 000 MPa
Coefficient de Poisson	0,3
Contrainte limite d'élasticité	285 MPa
Consistance	1 250 MPa
Exposant d'écroutissage	0,4

TAB. 2 – Données matériau utilisées pour les simulations par éléments finis.

2.2 Modélisation des conditions de chargement

Le test de gonflement consiste à appliquer une pression interne dans le tube. Pendant les expérimentations, la pression est générée par un apport croissant de fluide dans le tube. Avec le code LS-Dyna® deux possibilités sont offertes pour modéliser l'augmentation de pression interne dans le tube : 1) une pression interne est appliquée sur tous les éléments finis représentant le tube 2) la fonction AIRBAG permet un contrôle en volume.

Le contrôle en volume correspond au flux d'une masse de fluide ou de gaz à l'intérieur d'un volume fermé.

L'apport massique de fluide $\frac{dM}{dt}$, où M représentant la masse de fluide ou de gaz, est constant. La pression générée par ce flux de masse et le volume courant sont calculés à l'aide de la relation ci-dessous :

$$P(t) = k(t) \cdot \ln \left[\frac{V_0(t)}{V(t)} \right] \quad (2)$$

Où $P(t)$ est la pression courante, $k(t)$ le module compressibilité courante du fluide, $V(t)$ et $V_0(t)$ les volumes de fluide dans l'état comprimé ou non.

A la figure 3.a on représente l'évolution de la hauteur de gonflement pour des simulations fondées sur un contrôle en pression et en volume. Avec un contrôle en pression, la déformation du tube est quasi inexistante pendant la moitié de la durée du test, puis augmente de façon exponentielle. Avec un contrôle en volume, la hauteur de gonflement présente une évolution régulière. Dans le second cas, on est en mesure d'assurer un test de caractérisation plus répétitif car moins sujet à des instabilités plastiques prématurées. La figure 3.b représente l'évolution de la pression interne pendant le test. On a une évolution linéaire dans le cas d'un pilotage en pression qui correspond à la courbe de chargement imposée. Dans le cas d'un contrôle en volume, l'évolution de la pression est non linéaire et est le résultat d'un calcul fondé sur la relation (2).

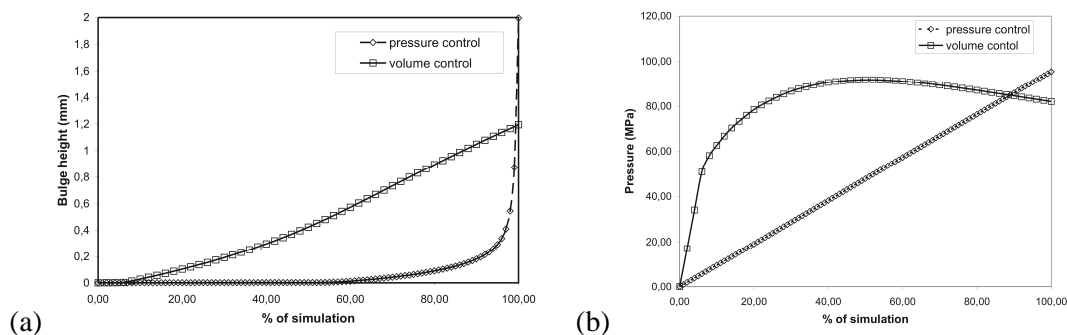


FIG 3. Evolution de la hauteur de gonflement (a) et de la pression (b) dans le cas d'un chargement en pression ou en apport massique de fluide (tube de demi-longueur 6mm, diamètre 2mm et d'épaisseur 0,3mm)

2.3 Considération des effets d'échelle

Dans ce paragraphe, le chargement en pression est modélisé par un contrôle en volume.

L'étude des effets d'échelle concerne : 1) la longueur de la zone de gonflement libre 2) le diamètre de tube 3)

l'épaisseur du tube.

Pour une exploitation efficace des tests expérimentaux à venir, il est nécessaire d'ordonner les différentes configurations de test et il est choisi d'imposer des rapports diamètre/épaisseur comme décrit au tableau 1. Ainsi on pourra étudier la variation du nombre de grains dans l'épaisseur afin d'étudier les effets d'échelle en référence à des travaux antérieurs [4].

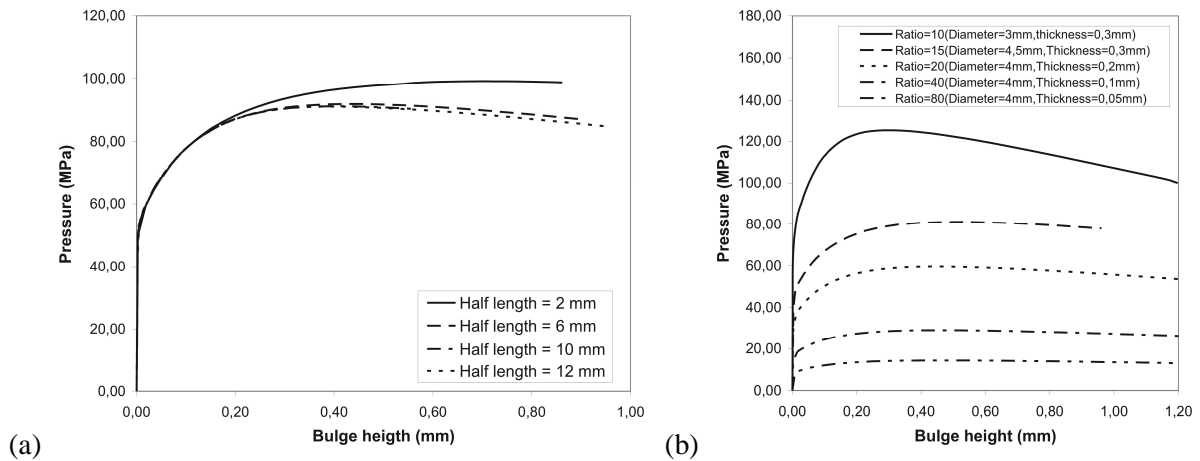


FIG 4. Influence sur la courbe pression – hauteur de gonflement (a) de la longueur libre (autres dimensions du tube : diamètre = 4 mm ; épaisseur = 0,3 mm) (b) et du rapport diamètre/épaisseur.

Les figures 4.a. et 4.b. donnent les évolutions de la pression dans la cavité en fonction de la hauteur de gonflement respectivement pour des longueurs libres ou des ratios diamètres/épaisseurs imposés. On peut ici retrouver un phénomène aisément observable à l'aide d'un ballon de baudruche. En effet, lors du gonflage du ballon, il est nécessaire d'apporter une très grande quantité (volume) de fluide dans la cavité afin d'augmenter la pression. Une fois le gonflage initié, i.e. dans le cas du tube le passage dans le domaine inélastique, le seul apport de volume tend à déformer le composant et la pression chute légèrement.

3 Conception et instrumentation

3.1 Conception du pilote expérimental pour le test de gonflement libre de micro tubes

Les différentes simulations menées fournissent des informations sur les efforts auxquels seront soumis les outillages, sur les niveaux de pression à atteindre et le volume de fluide nécessaire pour déformer le tube.

L'outil, représenté à la figure 5, sera réalisé en deux parties dans lesquelles un guide et une cavité seront usinés pour le positionnement du micro tube et son gonflement libre. Les guides permettront d'assurer un positionnement coaxial des tubes sans risque de cisaillement de l'échantillon. Le principal inconvénient est qu'un outillage ne permettra d'explorer qu'une seule longueur de gonflement libre et un seul diamètre extérieur.

L'étanchéité est assurée par la combinaison d'un usinage conique dans la matrice et d'un piston conique qui assurent également l'encastrement du tube à ses deux extrémités. Un des pistons possède un évent afin d'évacuer l'air prisonnier dans le tube pendant son remplissage avec le fluide, par analogie avec la conception des moules en injection. L'autre piston présente un perçage central pour l'alimentation en fluide afin de générer une augmentation de pression dans le micro-tube.

Cet outillage est associé à un piston à deux étages permettant la génération de la pression à injecter dans le tube. Le piston primaire de très petit diamètre génère la pression interne ; ses faibles dimensions permettent une évaluation du volume de fluide injecté avec une très grande précision en suivant son déplacement. Il est associé à un piston secondaire de dimensions plus importantes dont le rôle principal est d'assurer le guidage du piston primaire. Ce second piston est connecté à la cellule de force d'une machine de traction conventionnelle ; cela permet d'avoir accès à son déplacement et à la force de réaction pendant l'expérience.

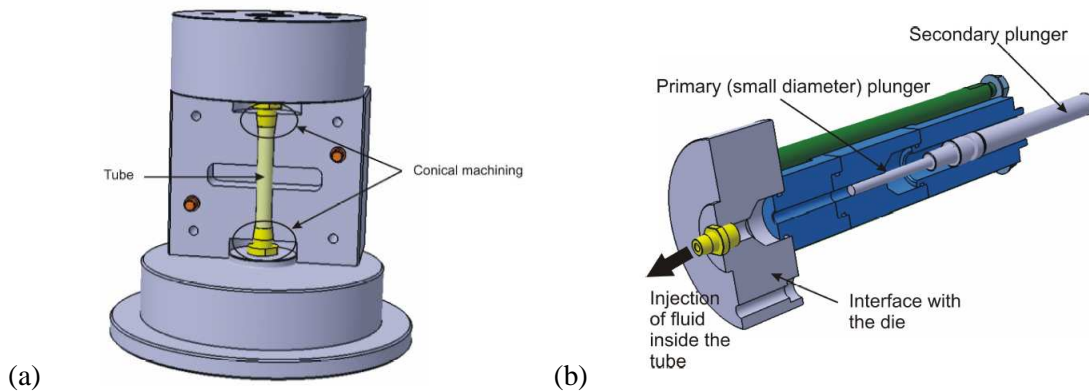


FIG 5. (a) Outil ouvert avec le micro-tube en place ; les dimensions de la matrice sont 45x50x15 mm (b) Conception du double piston avec son interface avec l'outil.

3.2 Les choix pour l'instrumentation

Pour la caractérisation mécanique du matériau constituant les micro-tubes, l'outillage décrit au paragraphe précédent doit être complété avec une instrumentation spécifique. Par analogie avec le test de gonflement libre de tube traditionnel [3], on doit mesurer la pression interne dans le tube et la hauteur de gonflement au centre de la zone libre.

La pression sera mesurée à partir des efforts mesurés par la cellule de force. Comme des fuites peuvent exister, un capteur de déplacement sera implanté au niveau du piston primaire. La comparaison des évolutions temporelles du déplacement du piston primaire, de celui mesuré au niveau de la machine de traction et de la pression permettront les corrections nécessaires pour tenir compte des fuites éventuelles.

Pour mesurer la hauteur de gonflement, on ne pourra pas utiliser une méthode avec contact afin de ne pas perturber l'essai. La mesure au niveau du pôle telle qu'elle est effectuée dans [3] est à proscrire ; en effet, on a mis en évidence dans [5] qu'une erreur de positionnement pour cette mesure peut entraîner d'importantes incertitudes sur la loi de comportement cherchée. On choisit donc de réaliser la mesure à l'aide d'un laser ligne. Il permet de mesurer le profil de la zone gonflée sans contact ; le pôle peut être trouvé même si le positionnement n'est pas parfait ; de plus, on possède 640 points de mesure avec une précision de 2 μm . La principale difficulté est la réalisation d'une fenêtre d'observation suffisamment large au niveau de la cavité ; un angle de 45° est nécessaire entre les rayons incident et réfléchi. On donne à la figure 6 un exemple de mesure de profil réalisée à l'aide du laser ligne.

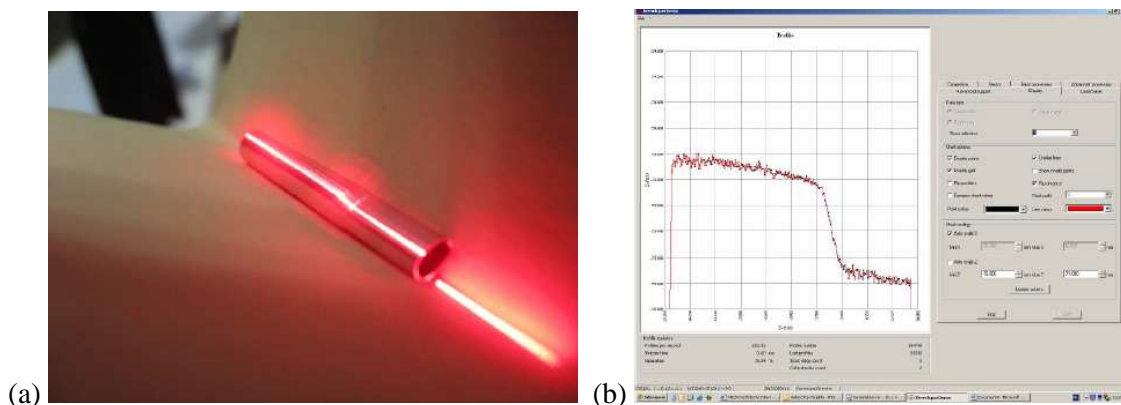


FIG 6. Mesure de profil à l'aide du laser ligne (a) Micro-tube avec formes (b) Profil mesuré.

4 Conclusions

La miniaturisation des procédés de fabrication mécanique est un challenge ; ces procédés peuvent venir compléter, voire concurrencer, les procédés issus de la microélectronique. Les champs applicatifs sont

nombreux : biomédical, espace, télécommunication, militaire, horlogerie, luxe.

Les problématiques scientifiques sont nombreuses ; ici, on s'intéresse à la caractérisation et la modélisation des matériaux en faible dimension sous forme de tube.

Dans un premier temps, des simulations éléments finis, sans prise en compte des effets d'échelle, ont permis de dégager des données globales utiles pour la conception d'un test de caractérisation. Elles ont également mis en évidence l'importance du chargement sur le bon déroulement du test.

L'originalité de l'outillage développé est la conception d'un double piston où sont découplés les aspects guidage en translation et génération de pression. La pression sera créée grâce à l'effort développé par une machine de traction sur laquelle sera monté l'outillage.

Enfin, une instrumentation spécifique a été proposée pour mesurer le profil du tube au cours de sa déformation et contrôler le volume de fluide générateur de pression interne.

Références

- [1] F. Vollertsen, Z. Hu, H.S. Niehoff, and C. Theiler. State of the art in micro forming and investigations in micro deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 151 :70–79, 2004
- [2] F. Vollertsen, D. Biermann, H.N. Hansen, I.S. Jawahir, and K. Kuzman. Size effects in manufacturing of metallic components. *CIRP Annals*, 58 :566–587, 2009
- [3] Velasco R., Boudeau N., Tube bulging test: theoretical analysis and numerical validation, *Journal of Material Processing Technology*, 205(1-3), 51-59, 2008.
- [4] Barbier C., Thibaud S., Picart P., Size effects on material behaviour in microforming, *International Journal of Material Forming*, 1(1), 439-442, 2008.
- [5] Ben Ouirane A.H., Velasco R., Michel G., Boudeau N., Error evaluation on experimental stress-strain curve obtained from tube bulging test, *International Journal of Material Forming*, 3(1), 195-198, 2010.