

Caractérisation mécanique de tubes par gonflement : analyse théorique et simulations numériques par éléments finis

Raphaël Velasco, Nathalie Boudeau

Institut Femto-ST
Laboratoire de Mécanique appliquée Raymond Chaléat
24 Chemin de l'épitaque, 25000 Besançon, France
raphael.velasco@univ-fcomte.fr

Résumé :

Cet article s'intéresse à la détermination des propriétés mécaniques de matériaux sous forme de tubes par l'utilisation du procédé de gonflement.. Une étude comparative est réalisée entre deux modèles : une analyse théorique et un modèle par éléments finis. Le modèle théorique se base sur une analyse géométrique du profil du tube au cours du gonflement, qui est supposé se déformer en formant des arcs de cercle. Une analyse du comportement mécanique complète le modèle théorique, permettant ainsi d'évaluer l'état de contrainte et de déformation, ainsi que l'épaisseur du tube en n'importe quel point du gonflement. On simule par ailleurs sous LS-Dyna 970 le gonflement d'un tube en acier inoxydable 304L. Afin de valider cette étude, une analyse comparative sur plusieurs paramètres est finalement menée : la variation de l'épaisseur du tube au sommet du gonflement au cours de celui-ci, la variation d'épaisseur en fonction de la coordonnée axiale Z du tube à la fin du gonflement, et enfin la contrainte de von Mises du tube en fonction de sa déformation plastique.

Abstract :

This paper is focused on the determination of mechanics characteristics for tubular materials, using tube bulge process. A comparative study is made between two different models: theoretical model and finite element analysis. The theoretical model is completely developed, based first on a geometrical analysis of the tube profile during bulging, which is assumed to strain in arc of circles. Strain and stress analysis complete the theoretical model, which allows to evaluate tube thickness and state of stress, at any point of the free bulge region. Free bulging of a 304L stainless steel is simulated using Ls-Dyna 970. To validate FE simulations approach, a comparison between theoretical and finite elements models is led on several parameters such as: thickness variation at the free bulge region pole with bulge height, tube thickness variation with z axial coordinate, and von Mises stress variation with plastic strain.

Mots-clefs : gonflement de tubes, caractérisation de matériaux, simulations numériques par EF

1 Introduction

L'essai de gonflement est un test très utile pour la caractérisation de matériaux sous forme de tubes (Koç *et al* (2001)). Bien que les procédés de fabrication par hydroformage deviennent de plus en plus présents, et en particulier dans l'industrie automobile (Ahmetoglu *et al.* (2000), Siegert *et al.* (2000)), l'essai de gonflement de tubes n'est pour l'instant que très peu utilisé. Fuchizawa et Narazaki (1993) ont publié un article de référence sur le sujet, qui met en parallèle un modèle analytique et des essais expérimentaux, avec pour but de comparer les résultats de ces essais à ceux d'essais de traction uniaxial. Leurs conclusions mettent en avant le fait que la caractérisation de matériaux tubulaires devraient se faire en utilisant des tests de gonflement, car les procédés de roulage de tubes et de soudage modifient la structure de ceux-ci pendant leur

fabrication. Cette étude a été complétée par la suite par des simulations numériques par éléments finis (Sokolowski *et al.* (2000)), qui permettent de simuler un tube au cours d'une application d'hydroformage, en utilisant une loi de comportement pertinente obtenue par gonflement, pour décrire le comportement des tubes sous une sollicitation en pression interne. Strano et Altan (2004) ont implémenté un modèle théorique complètement différent, basé sur une analyse énergétique inverse pour la détermination de lois de comportement de tubes. Elle a permis de mettre également en avant la pertinence des tests de gonflement, par rapport aux tests de traction traditionnels. Hwang et Lin (2002, 2006) ont suggéré un autre modèle mathématique, couplé à des essais expérimentaux, qui ont permis d'étudier l'influence de paramètres tels que l'épaisseur du tube, sa longueur initial, les coefficients de frottement sur la variation de pression au cours du gonflement. Il est apparu que leur modèle théorique permettait d'approcher au mieux la loi de variation de la pression au cours du gonflement, en comparaison avec le modèle de Fuchizawa ou encore avec des résultats d'essais de traction.

2 Modèle analytique

Le modèle géométrique qui sera utilisé tout au long de l'article est tout d'abord décrit. La FIG. 1 et la TABLE 1 donne une vue schématique du gonflement de tubes, ainsi que le paramétrage adopté. Quelques hypothèses ont été faites :

- Dans la zone de gonflement, le tube est supposé se déformer en formant deux arcs de cercles dont les centres respectifs se déplacent sur l'axe Y au cours du gonflement
- Le gonflement est parfaitement symétrique par rapport à l'axe Y
- Les résultats obtenus en utilisant ce modèle seront valables loin des bords du gonflement
- Les calculs sont réalisés sur des tubes minces (épaisseur : 1mm)

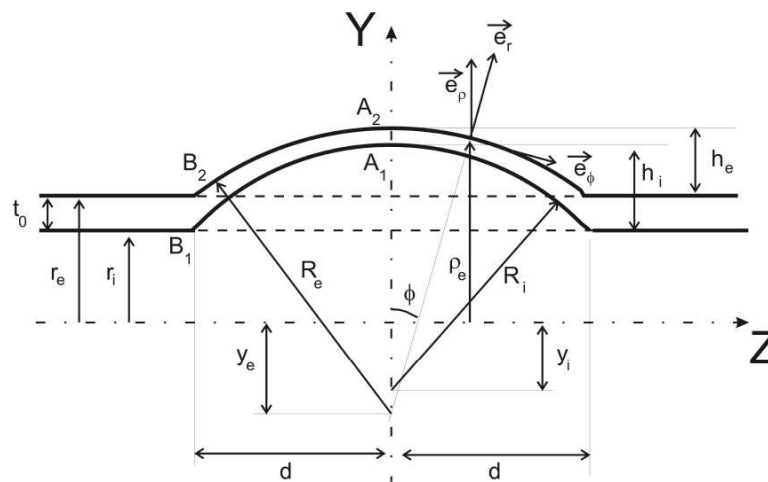


FIG. 1 – Paramétrage du gonflement de tubes.

r_i , r_e et t_0 sont des paramètres géométriques définis par le choix du tube. Pour l'ensemble de la démarche, la longueur du gonflement $2.d$ sera fixe et égale à 50mm. h_e est le paramètre connu qui définit la hauteur de gonflement. R_e et y_e sont des fonctions de h_e . h_i est l'unique inconnu du système qui permet de définir l'épaisseur du tube, d'abord au sommet du gonflement puis dans toute la zone de gonflement. Ce modèle n'est pas focalisé sur le sommet du gonflement, puisqu'il permet de prendre en compte des erreurs de positionnement pour la mesure de h_e .

TABLE 1 – Paramétrage géométrique du procédé de gonflement de tube

Paramètre	Description
r_i	Rayon interne du tube
r_e	Rayon externe du tube
t_0	Epaisseur initiale du tube
$2.d$	Longueur de la zone de gonflement
R_i	Rayon de courbure interne du tube déformé dans le plan (Y,Z)
R_e	Rayon de courbure externe du tube déformé dans le plan (Y,Z)
ρ	Rayon de courbure du tube déformé dans le plan (X,Y)
y_i	Distance entre le centre de la courbure interne du tube et l'axe du tube
y_e	Distance entre le centre de la courbure externe du tube et l'axe du tube
h_i	Hauteur de gonflement interne du tube
h_e	Hauteur de gonflement externe du tube
$t(z)$	Epaisseur du tube à la coordonnée z

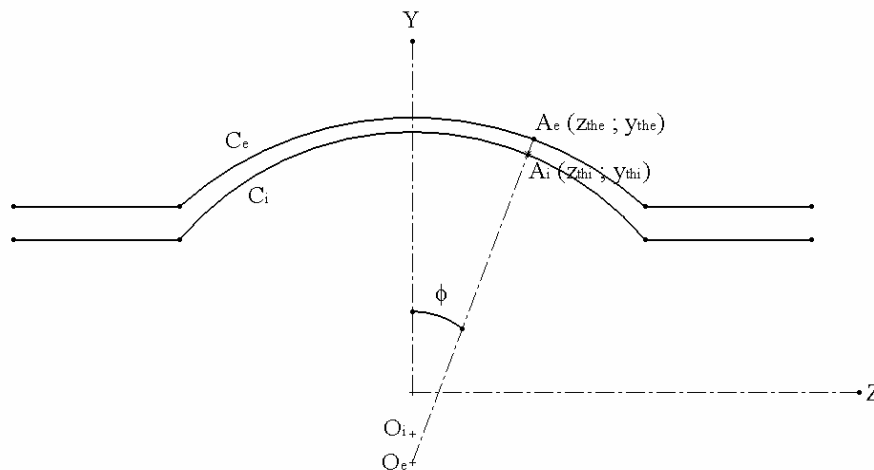
1.1 Détermination de l'épaisseur du tube

L'épaisseur du tube est déterminée en utilisant des calculs de volumes de matière couplés à l'hypothèse d'incompressibilité du matériau dans la zone de gonflement. Un algorithme de Newton-Raphson permet de résoudre le système non-linéaire (EQ. (1)) d'inconnu h_i , pour déterminer l'épaisseur du tube $t(0)$.

$$V_e - V_i(h_i) = V_0 \quad (1)$$

V_e et V_i représentent respectivement les volumes externes et internes de la zone de gonflement. V_0 est le volume de matière initial de cette zone. Résoudre cette équation permet de calculer $t(0)$, en utilisant EQ. (2), puis $t(z)$, qui est déterminé géométriquement. (FIG. 2) (EQ. 3).

$$t(0) = t_0 + h_e - h_i \quad (2)$$

FIG. 2 – Paramétrage géométrique pour le calcul de $t(z)$.

$$t(z) = t(z_{the}) = \overline{A_e A_i} = \sqrt{(z_{the} - z_{thi})^2 + (y_{the} - y_{thi})^2} \quad (3)$$

1.2 Détermination de l'état de contrainte et de déformation du tube

L'état de déformation d'un tube soumis à une pression interne est représenté par le tenseur (4).

$$\underline{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_r & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_\phi \end{pmatrix} \quad (4)$$

Les trois déformations principales sont données en EQ (5).

$$\varepsilon_r = \ln\left(\frac{t(z)}{t_0}\right), \quad \varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{\rho(z)}{r_e}\right), \quad \varepsilon_\phi = -\varepsilon_r - \varepsilon_\theta \quad (5)$$

L'état de contrainte d'un tube mince ($t_0 \ll r$) soumis à une pression interne est représenté par le tenseur (6).

$$\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\phi(\phi) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Les deux contraintes principales en tout point du tube sont exprimées sur EQ. 7.

$$\frac{\sigma_\phi}{R} + \cos(\phi) \cdot \frac{\sigma_\theta}{\rho} = \frac{p}{t}, \quad \sigma_\phi = \frac{\rho \cdot p}{2 \cdot t \cdot \cos(\phi)} \quad (7)$$

2 Comparaison entre les résultats analytiques et le modèle numérique par éléments finis

2.1 Détermination de l'état de contrainte et de déformation du tube

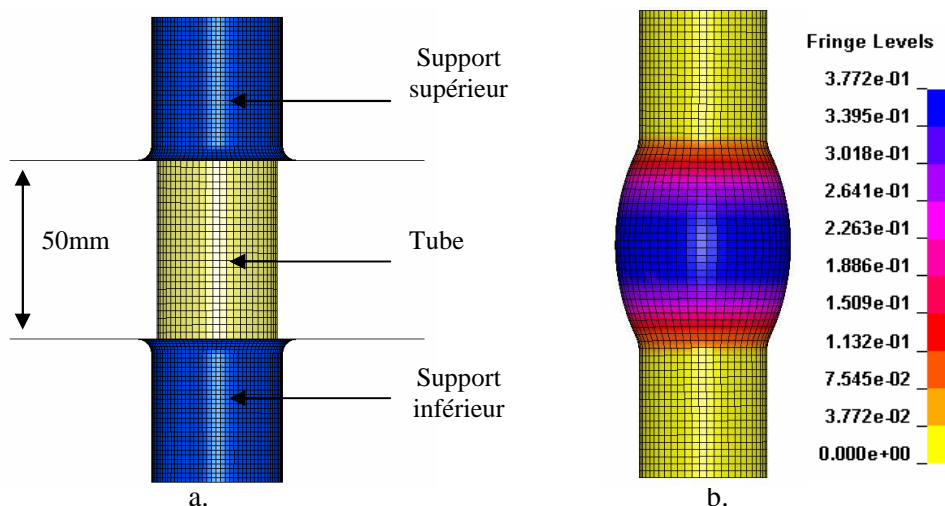


FIG. 3 – a. Modèle éléments finis du gonflement de tubes / b. Déformation plastique du tube (max : 38%).

Un modèle numérique par éléments finis a été implémenté dans LS-Dyna 970. Les simulations numériques ont été réalisées sur un acier inoxydable 304L, en utilisant une loi de Swift (EQ. (8)) pour décrire le comportement du matériau.

$$\bar{\sigma} = k.(\varepsilon_{yp} + \bar{\varepsilon})^n \quad (8)$$

La variation de pression en fonction du temps est linéaire, de 0 à 38MPa à la fin du gonflement. FIG. 3.a. illustre le modèle éléments finis de gonflement de tubes utilisé, et FIG. 3.b. expose la déformation du tube à la fin du gonflement.

2.2 Comparaison des résultats (simulations numériques / modèle analytique)

Le modèle analytique, implémenté dans Scilab, a besoin d'une loi de comportement liant la pression à la hauteur de gonflement pour fonctionner. Cette loi est extrapolée des résultats obtenus en simulation numérique (FIG. 4.a.). Les lois de comportement sont tracées sur FIG. 4.b. La loi de comportement analytique se superpose parfaitement à la loi de Swift utilisée en simulations numériques. Ceci indique que le modèle Scilab permet de retrouver une loi de comportement, en partant d'une courbe de pression/hauteur de gonflement uniquement. Pour valider proprement le modèle par éléments finis, une comparaison avec des résultats expérimentaux sur la variation de pression au cours du gonflement devra être menée. FIG. 5.a. illustre la comparaison sur l'épaisseur du tube au sommet du gonflement durant le procédé. On remarque que la courbe analytique concorde très bien avec celle de la simulation numérique. Au plus haut niveau de déformation (38%), une légère différence entre les deux courbes semble se manifester, car les effets de bords deviennent certainement trop influents. FIG. 5.b. expose enfin la comparaison réalisée sur la variation d'épaisseur en fonction de la coordonnée axiale z à la fin du gonflement. Une zone de pertinence peut être défini entre $z=-15\text{mm}$ et $z=+15\text{mm}$, où l'erreur observée entre les deux résultats restent en dessous de 1%.

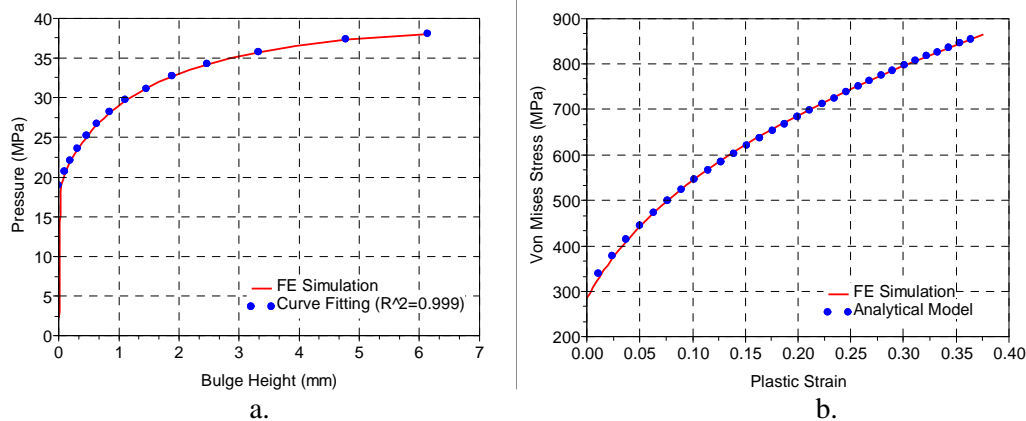


FIG. 4 – a. Variation de pression en fonction de la hauteur de gonflement / b. Contrainte de von Mises en fonction de la déformation plastique

3 Conclusion

Cet article développe un modèle théorique capable de décrire le comportement d'un tube durant un essai de gonflement. Basé sur une approche géométrique nécessaire pour évaluer l'épaisseur du tube durant le gonflement, il permet de déterminer la loi de comportement mécanique d'un tube choisi. Pour évaluer la pertinence du modèle, des simulations numériques par éléments finis ont été menées sur un tube en acier 304L. Jusqu'à 40% de déformation, on a

pu constater une très bonne corrélation entre les résultats analytiques et les résultats numériques sur plusieurs paramètres. Des essais expérimentaux vont venir compléter cette étude pour avoir des données expérimentales sur la variation de pression au cours du gonflement.

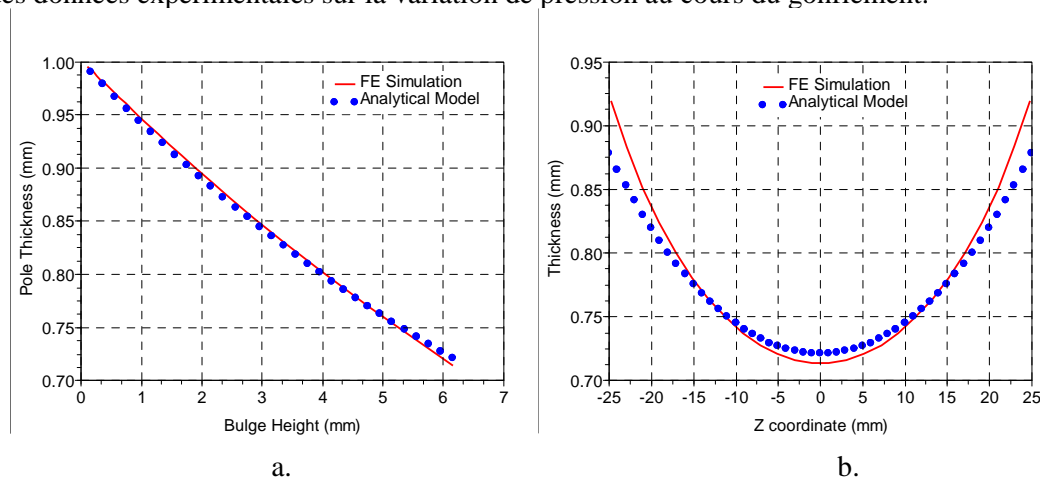


FIG. 5 – a. Epaisseur du tube au sommet du gonflement en fonction de la hauteur de gonflement / b. Epaisseur du tube en fonction de la coordonnée z

Rémerciements

Ces travaux de recherche sont soutenus par la communauté européenne au travers du projet intégré STORHY.

Références

- M. Koç, Y. Aue-u-lan, T. Altan 2001 On the characteristics of tubular materials for hydroforming – experimentation and analysis, *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture* **41** 761-772.
- M. Ahmetoglu, K. Sutter, X.J. Li, T. Altan 2000 Tube Hydroforming: current research, applications and need for training, *Journal of materials Processing Technology* **98** 224-231
- M. Ahmetoglu, T. Altan 2000 Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends, *Journal of Materials Processing Technology* **98** 25-33
- K. Siegert, M. Häussermann, B. Lösch, R. Rieger 2000 Tube hydroforming: current research, applications, and need for training, *Journal of Materials Processing Technology* **98** 251-258
- S. Fuchizawa, M. Narazaki 1993 Bulge test for determining Stress-Strain characteristics of thin tubes, *Advanced Technology of plasticity – Proceeding of the Fourth International Conference on Technology of Plasticity* 488-493
- T. Sokolowski, K. Gerke, M. Ahmetoglu, T. Altan 2000 Evaluation of tube formability and materials characteristics: hydraulic bulge testing of tubes, *Journal of Materials Processing Technology* **98** 34-40
- M. Strano, T. Altan 2004 An inverse energy approach to determine the flow stress of tubular materials for hydroforming applications, *Journal of Materials Processing Technology* **146** 92-96
- Y.M. Hwang, Y. K. Lin 2002 Analysis and finite element simulation of the tube bulge hydroforming process, *Journal of Materials Processing Technology* **125-126** 821-825
- Y.M. Hwang, Y.K. Lin, T. Altan 2006 Evaluation of tubular materials by hydraulic bulge test, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*