

Comparaison de trois modèles pour le post-traitement de mesures issues du test de gonflement libre de tubes

L. VITU^a, N. BOUDEAU^{a,b}, P. MALECOT^{a,b}, G. MICHEL^{a,b}, A. BUTERI^c

a. FEMTO-ST, Département de Mécanique Appliquée, 24 rue de l'Épithaphe, 25000 Besançon, France

b. ENSMM, 26 rue de l'Épithaphe, 25000 Besançon, France

c. APERAM, Centre de Recherches, 62230 Isbergues, France

Résumé :

Le procédé d'hydroformage de tube consiste à mettre en forme un tube dans une matrice de forme à l'aide d'une pression interne. Pour simuler ce procédé, il est nécessaire d'obtenir les données matériau pertinentes pour le tube. Il est reconnu que ces données sont plus appropriées si elles sont issues d'un essai de Gonflement libre de Tube (G.T.) plutôt que d'un essai de traction. L'obtention de la courbe d'écrouissage à partir d'un G.T requiert l'utilisation d'un modèle analytique. Ce papier propose la comparaison de trois modèles compatibles avec la procédure expérimentale disponible à FEMTO-ST.

Abstract :

The process of tube hydroforming consists of deforming a tube in a shaped die with an internal pressure. For performing predictive numerical simulations of this process, precise material data are needed. It is now well recognized that these material characteristics are more appropriate if they are obtained from a Tube Bulging Test (T.B.T) instead of the classical tensile test. To obtain the hardening curve from a T.B.T, an analytical model is required. In this paper, a comparison of three analytical models which are compatible with the experimental procedure developed in the FEMTO Lab, is proposed.

Mots clefs : Hydroformage, Test de gonflement de tube, Modèle analytique, Courbe d'écrouissage.

1 Introduction

L'hydroformage consiste à mettre en forme un tube dans une cavité fermée à l'aide d'une pression interne. Cette technologie a un grand intérêt industriel puisqu'elle permet de réaliser des formes creuses complexes avec une meilleure qualité structurelle, tout en réduisant le nombre de cordons de

soudure. Elle est présente dans le secteur automobile où les pots d'échappement, les châssis, les carrosseries et les parties de sécurité, réalisés en acier inoxydable, en acier à faible ou moyenne teneur en carbone ou en aluminium allié, sont mis en forme par ce procédé [1].

En revanche, l'utilisation industrielle du procédé d'hydroformage est relativement difficile à mettre en œuvre car ce dernier présente de nombreux paramètres à régler pour éviter tout défaut tel que rupture ou striction, plissement, flambement [2]. Les simulations par éléments finis sont largement utilisées pour déterminer le jeu de paramètres du procédé permettant d'optimiser la qualité des pièces ainsi fabriquées. Cependant les résultats numériques obtenus sont affectés par la loi de comportement du matériau utilisée [3]. En effet, la réponse locale du matériau est fortement dépendante au type de sollicitation [4] et il est maintenant admis que les caractéristiques obtenues à partir d'un essai de traction ne sont pas satisfaisantes pour effectuer des simulations fiables d'hydroformage de tubes. Il est donc nécessaire d'obtenir la courbe d'écrouissage par d'autres tests.

Pour caractériser les matériaux sous forme de tube dédié à être mis en forme par hydroformage, le test de gonflement libre de tube a été développé. Le post-traitement des mesures expérimentales pour atteindre la courbe d'écrouissage n'est pas immédiat et nécessite l'utilisation d'un modèle. Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature. On propose de comparer trois modèles, compatibles avec la procédure expérimentale disponible à FEMTO-ST : Hwang 2007 [5], Boudeau-Velasco 2008 [6] et Boudeau-Malécot 2012 [7]. Le test de gonflement libre de tube n'étant pas toujours standardisé, il nous a semblé important d'étudier l'impact de la configuration du test sur la courbe d'écrouissage obtenue.

Le papier est organisé de la façon suivante :

- 1) Les différents modèles étudiés et leurs principales équations sont présentés.
- 2) L'approche employée pour leur comparaison est décrite. A l'aide de simulations numériques, différentes configurations du test de gonflement libre sont considérées et les courbes d'écrouissage obtenues par post-traitement à l'aide des différents modèles sont comparées.
- 3) Les principaux résultats sont présentés et discutés. La légère sensibilité de certains modèles à la configuration du test sera mise en évidence mais également l'équivalence des résultats obtenus.

2 Présentation des modèles analytiques

2.1 Présentation générale

Les trois modèles choisis sont compatibles avec la procédure expérimentale développée au laboratoire ; le tube est encastré à ses deux extrémités et est chargé par une pression interne uniquement. Pendant l'essai, la pression et la hauteur de gonflement sont mesurées. En injectant ces données dans les modèles, il est possible d'obtenir la courbe d'écrouissage. Pour les modèles étudiés, il est possible de différencier deux cas : dans les modèles de Hwang 2007 [5] et de Boudeau-Velasco 2008 [6], il est nécessaire de résoudre des équations non-linéaires ; ce sont donc des modèles semi-analytiques. Au contraire, le modèle Boudeau-Malécot 2012 [7] est lui complètement analytique. En effet, les résultats expérimentaux peuvent être traités directement avec un tableur (type Excel[®]) ; cela en fait un outil intéressant pour une utilisation en milieu industriel. Les principaux points communs et différences de ces trois modèles sont regroupés dans le tableau 1 et leurs fondements théoriques sont présentés dans les paragraphes suivants.

Modèles	Représentation géométrique	Évaluation des déformations	Évaluations des contraintes
Hwang 2007	Profil en forme d'ellipse	Conservation du volume	Équation de Fuchizawa définie au pôle
Velasco-Boudeau 2008	Profil en forme de cercle	= Équations non linéaire	Équilibre d'un volume élémentaire. Valable sur tout le tube
Boudeau-Malécot 2012		Déformation méridienne constante	

Tableau 1 – Analyse synthétique des ressemblances et des différences des trois modèles étudiés

2.2 Modèle de Hwang 2007

Le modèle de Hwang 2007 [5] représenté en figure 1 est fondé sur trois particularités :

- Le profil méridien du tube est représenté par un arc d'ellipse dans la zone d'expansion libre et par les rayons matrices. L'ellipse est définie à partir de son grand axe R_Z et son petit axe R_P :

$$\left(\frac{r}{R_P}\right)^2 + \left(\frac{z}{R_Z}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

- Le rayon matrice R_d et le point $E(R_E, Z_E)$ sont considérés ; le point E correspond à la frontière entre la zone de gonflement libre et la zone de contact avec le rayon matrice comme indiqué sur la figure 2.

- L'épaisseur le long du profil méridien suit une loi quadratique définie à partir de l'épaisseur au pôle P, t_p et l'épaisseur au point E, t_E :

$$\begin{cases} t(z) = t_P + \left(\frac{\omega}{\omega_E}\right)^2 (t_E - t_P) \\ \omega = \tan^{-1} \left[\frac{R_Z}{R_P} \cdot \tan \gamma \right] \\ \omega_E = \tan^{-1} \left(\frac{Z_E}{R_E} \right) \end{cases} \quad (2)$$

Où γ est le paramètre de l'ellipse.

L'ensemble des paramètres géométriques cités ci-dessus sont illustrés à la figure 1.

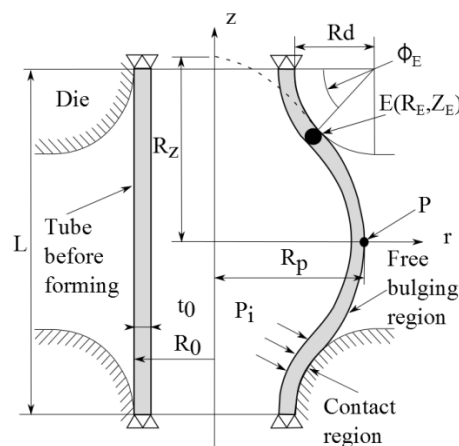


Figure 1 – Paramètres géométriques du modèle de Hwang 2007

Les coordonnées au point E peuvent être déterminées numériquement à partir de l'équation (1), alors que les épaisseurs t_p et t_E peuvent être calculées en utilisant la conservation de volume représentée par l'équation (3) :

$$V_{free}^{i+1} + \Delta V_{contact} = V_{free}^i \quad (3)$$

V_{free}^i et V_{free}^{i+1} correspondent aux volumes de matière dans la région libre aux instants i et $i+1$ respectivement et $\Delta V_{contact}$, à la variation de matière en contact avec le rayon matrice entre ces deux instants.

Le volume de matière dans la région libre est donné par :

$$\begin{cases} V_{free} = 2\pi \int_0^{\gamma_E} R_p \cdot \cos \gamma \cdot t(z) \cdot \sqrt{[R_p \cdot \sin \gamma]^2 + [R_z \cdot \cos \gamma]^2} d\gamma \\ \gamma_E = \tan^{-1} \left[\frac{R_p \cdot Z_E}{R_z \cdot R_E} \right] \end{cases} \quad (4)$$

L'incrément de volume du tube en contact avec la matrice est illustré sur la figure 2 et est exprimé par :

$$\Delta V_{contact} = 2\pi t_E(i) [R_0 + R_d(1 - \cos \phi_E(i)) - 0.5 t_E(i) \cos \phi_E(i)] [R_d + 0.5 t_E(i)] \Delta \phi_E \quad (5)$$

R_0 est le rayon initial du tube, t_E est l'épaisseur de l'élément du tube en contact et R_d le rayon matrice. Enfin, ϕ_E représente l'angle défini à la figure 2.

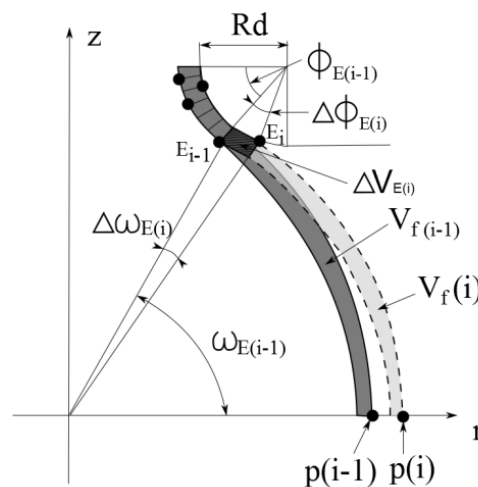


Figure 2 – Géométrie du tube aux étapes i et $i+1$

Il est alors possible de déterminer les déformations au pôle P :

$$\begin{cases} \varepsilon_\theta = \ln \left(\frac{R_p - 0.5 t_p}{R_0 - 0.5 t_0} \right) \\ \varepsilon_r = \ln \left(\frac{t_p}{t_0} \right) \\ \varepsilon_z = -(\varepsilon_\theta + \varepsilon_r) \end{cases} \quad (6)$$

Les contraintes au pôle, pour une pression interne p , sont calculées à partir des équations suivantes :

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{p (\rho_\theta - t_p)^2}{2 t_p (\rho_\theta - 0.5 t_p)} \\ \sigma_\theta = \frac{p (\rho_\theta - t_p)}{2 t_p (\rho_z - 0.5 t_p)} (2 \rho_z - \rho_\theta - t_p) \end{cases} \quad (7)$$

Avec :

$$\begin{cases} \rho_z = \frac{R_z^2}{R_p} \\ \rho_\theta = R_p \end{cases} \quad (8)$$

Plus de détails peuvent être trouvés dans [5].

2.3 Modèle de Boudeau-Velasco 2008

Ce modèle considère que la zone de gonflement libre du tube se déforme sous la forme de deux arcs de cercle : le premier de rayon R et de centre $C(y, 0)$ dans la direction longitudinale, et le second de rayon r et de centre $O(0,0)$ dans la direction circonférentielle comme le montre la figure 3. L'indice i est utilisé pour ce qui concerne le profil intérieur et e pour le profil extérieur. Ainsi le rayon du cercle représentant le profil longitudinal du tube déformé et la position de son centre sont :

$$\begin{cases} R_q = \frac{d^2 + h_q^2}{2 \cdot h_q} \\ y_q = \frac{d^2}{2 \cdot h_q} - \frac{h_q}{2} - r_q \end{cases} \quad \text{avec } q = e, i \quad (9)$$

Avec :

$$\begin{cases} r_e = r_0 + h_e \\ r_i = r_0 - t_0 + h_i \end{cases} \quad (10)$$

r_0 et t_0 correspondent au rayon initial et à l'épaisseur initiale du tube, d est la demi-longueur libre de la fenêtre de gonflement libre du tube, h_e est la hauteur de gonflement mesurée sur la surface extérieure du tube et h_i la hauteur intérieure du tube, qui ne peut être mesurée :

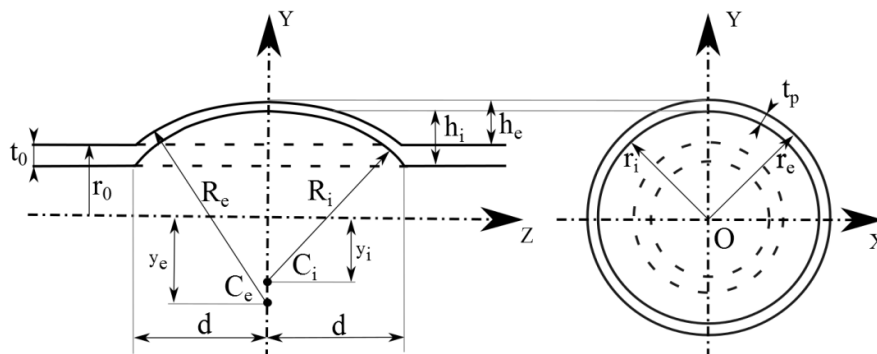


Figure 3– Paramètres géométriques du modèle de Boudeau-Velasco 2008

Pour chaque point, la différence entre la surface extérieure et intérieure donne l'épaisseur du tube et au pôle, on a en particulier :

$$t_p = t_0 + h_e - h_i \quad (11)$$

Le volume de matière comprise entre les arcs de cercle extérieur et intérieur s'exprime alors :

$$\begin{cases} V_{material} = V_e - V_i \\ V_q = 2\pi \int_0^d Y_q(Z) dZ \\ Y_q(Z) = -y_q - \sqrt{R_q^2 - Z^2} \end{cases} \quad \text{avec } q = e, i \quad (12)$$

La condition d'incompressibilité plastique donne alors :

$$V_{material}(d, r_i, r_e, y_i, y_e, h_i, h_e) = V_0 = \pi d(r_e^2 - r_i^2) \quad (13)$$

L'équation (13) conduit à une équation non-linéaire où h_i est l'unique inconnue qui peut être déterminée avec un algorithme de Newton-Raphson. Une fois h_i connue, les profils longitudinaux intérieur et extérieur sont connus et l'épaisseur peut être déterminée sur l'ensemble du tube. Ainsi, les déformations sont données grâce aux relations suivantes :

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \ln\left(\frac{t(Z)}{t_0}\right) \\ \varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{Y(Z)}{r_0}\right) \\ \varepsilon_z = -(\varepsilon_\theta + \varepsilon_r) \end{cases} \quad (14)$$

Les contraintes sont déterminées en écrivant l'équilibre de plusieurs volumes élémentaires judicieusement choisis [6] et leur expression est :

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{pY}{2t \cos \phi} \\ \sigma_\theta = \frac{pY}{t \cos \phi} \left[1 - \frac{Y}{2R \cos \phi}\right] \end{cases} \quad (15)$$

Où $\phi \in [0; \phi_{max}]$ et $\phi_{max} = \sin^{-1}\left(\frac{d}{R}\right)$

2.4 Modèle de Boudeau-Malécot 2012

Ce modèle [7] est une simplification du modèle de Boudeau-Velasco [6] et est complètement analytique. Ceci a été possible en observant une faible variation de la déformation méridienne ε_z qui a donc été approximée par sa valeur moyenne sur l'ensemble du profil. Ainsi les expressions pour les déformations deviennent :

$$\begin{cases} \varepsilon_z \approx \ln\left(\frac{R \cdot \phi_{max}}{d}\right) = cste \\ \varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{Y(Z)}{r_0}\right) \\ \varepsilon_r = -(\varepsilon_z + \varepsilon_\theta) \end{cases} \quad (16)$$

La distribution d'épaisseur dans le tube peut-être obtenue à partir de la déformation radiale ε_r :

$$t(z) = t_0 e^{\varepsilon_r(z)} \quad (17)$$

Le calcul des contraintes reste inchangé et les expressions données par l'équation (15) restent applicables. Plus de détails peuvent être trouvés dans [7].

3 Comparaison des modèles de post-traitement du test de gonflement libre de tube

3.1 Procédure de comparaison

Comme cela a déjà été dit, il n'y a pas de recommandation pour la réalisation des tests de gonflement libre de tube. Afin de contrôler l'influence des caractéristiques géométriques de ce test la courbe d'écroutissage résultante du matériau d'une part, et d'évaluer les trois modèles de post-traitement des résultats expérimentaux d'autre part, il est proposé de mener des simulations éléments finis du test sous ses différentes configurations.

Pour réaliser ces simulations, certaines données telles que la courbe de chargement (pression en fonction du temps) et la courbe d'écroutissage sont nécessaires. Celles-ci sont issues d'une étude précédente [7] réalisée sur un tube en 316L sans soudure fabriqué par étirage à froid. Le test de gonflement libre a été réalisé au laboratoire dans sa configuration de référence, c'est-à-dire avec une longueur libre de 50 mm et un rayon matrice de 5mm. La loi de chargement expérimentale est une rampe de 0,1 MPa/s. A partir de cet essai, la courbe de pression en fonction de la hauteur de gonflement a été obtenue et post-traitée avec le modèle de Boudeau-Malécot 2012 pour obtenir la courbe d'écroutissage. Cette courbe d'écroutissage est appelée "courbe d'écroutissage imposée" dans tout ce qui suit.

L'étude de l'influence des caractéristiques géométriques du test de gonflement de tube est réalisée en exécutant différentes simulations par éléments finis pour plusieurs configurations représentées par différents rayons matrices et longueurs libres. Les données d'entrée (évolution temporelle de la pression interne et courbe d'écroutissage) sont identiques pour toutes les simulations. Les résultats en sortie des simulations sont des courbes de pression en fonction de la hauteur de gonflement qui sont elles-mêmes injectées en données d'entrée des modèles analytiques. Les courbes d'écroutissage obtenues en sortie des modèles analytiques sont alors comparées à celles d'entrée des simulations numériques. La figure 4 ci-dessous résume la procédure de comparaison.

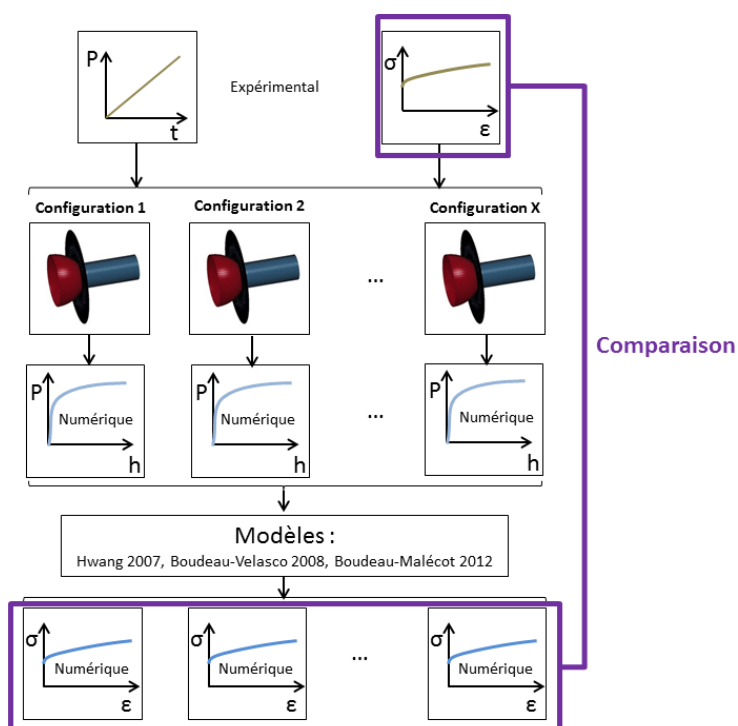


Figure 4– Influence de la configuration sur la caractérisation du matériau

3.2 Modèle éléments finis

Les simulations éléments finis sont réalisées avec le logiciel Ls-Dyna®. La géométrie complète du tube est modélisée et le maillage est réalisé avec des éléments coque de type Belytchko-Tsay. Une évolution de pression de 0.1MPa/s est imposée pour correspondre aux conditions expérimentales du test de gonflement libre effectué au sein du laboratoire. Le comportement du matériau est considéré comme élastoplastique et isotrope. Pour le tube, la loi d'érouissage est donnée point par point en utilisant les données issues du post-traitement de la courbe pression en fonction de la hauteur de gonflement à travers le modèle analytique de Boudeau-Malécot 2012. Les informations principales du modèle éléments finis sont résumées dans le tableau 2. Les résultats issus des modèles éléments finis sont illustrés en figure 5.

Tube	Type : élément coque Formulation : Belytchko-Tsay Taille moyenne : 1.7 mm Epaisseur : 1 mm Diamètre extérieur : 35 mm Longueur totale : 250mm Maillage : 8582 noeuds et 8404 éléments Matière : courbe d'érouissage décrite par les couples discrets (σ, ϵ)
Matrice	Type : élément coque Taille moyenne : 1.7 mm Maillage : 7750 noeuds and 7688 éléments Matière : rigide
Temps de simulation	0.001s
Chargement	Pression interne
Schéma d'intégration	Implicite
Conditions aux limites	Extrémités du tube fixes

Tableau 2 – Caractéristiques du modèle éléments finis

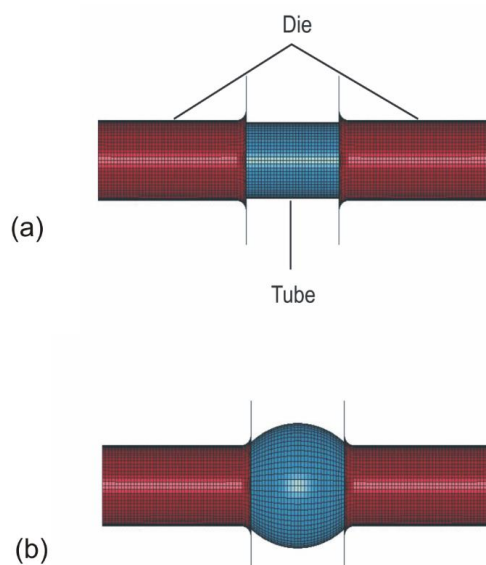


Figure 5– Simulation éléments finis à l'étape initiale et à l'étape finale

4 Résultats et discussion

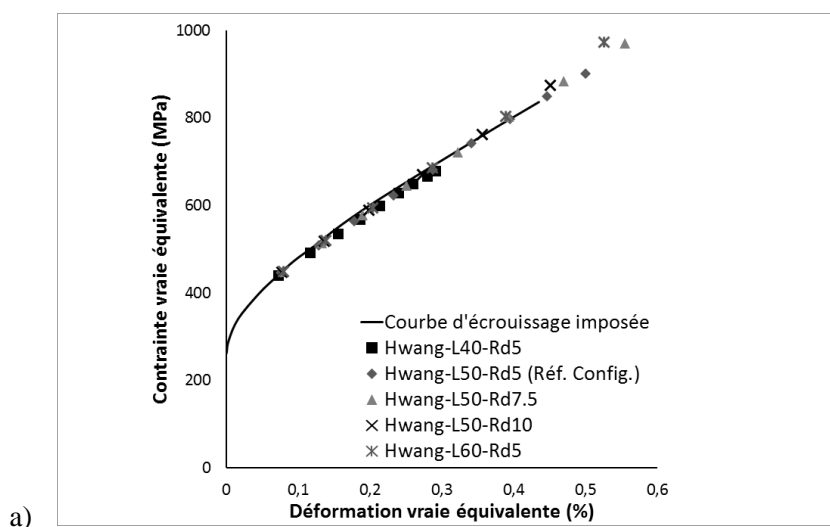
L'influence la configuration du test de gonflement sur la caractérisation du matériau a été étudiée. Pour ce faire, quatre configurations, différentes de la configuration de référence ont été considérées. Ces configurations sont listées dans le tableau 3 où la configuration de référence correspond à une longueur libre de 50mm et un rayon matrice de 5mm. Toutes les simulations ont été réalisées dans les mêmes conditions pour chaque configuration en suivant les données du tableau 2.

N° configuration	Longueur libre L (mm)	Rayon matrice Rd (mm)
Configuration de référence	50	5
1	50	7.5
2	50	10
3	40	5
4	60	5

Tableau 3 – Caractéristiques des différentes configurations

Sur la figure 6, la courbe d'écroissage imposée comme entrée de la simulation éléments finis est comparée avec les courbes d'écroissage obtenues par post-traitement à l'aide des trois modèles des courbes pression-hauteur de gonflement résultant des E.F. La configuration de l'essai a peu d'influence sur la courbe d'écroissage obtenue par le modèle de Hwang comme on peut le voir sur la figure 6.a. Du fait que le modèle de Hwang tient compte du rayon matrice, il est moins sensible à la configuration du test de GT. Les modèles de Boudeau-Velasco et Boudeau-Malécot donnent des résultats très similaires (figure 6.b et figure 6.c) mais on constate un peu plus de dispersion suivant la configuration de l'essai considérée.

Il peut être observé que la courbe obtenue en post-traitant les résultats éléments finis issus de la configuration N°4 (L=60mm et Rd=5mm) est plus proche de la courbe imposée. Cette configuration correspond peut-être à la configuration optimale pour la caractérisation du gonflement de tube pour les dimensions des tubes étudiés dans notre cas. Quoiqu'il en soit, les trois modèles sont globalement équivalents et leur validité est démontrée.



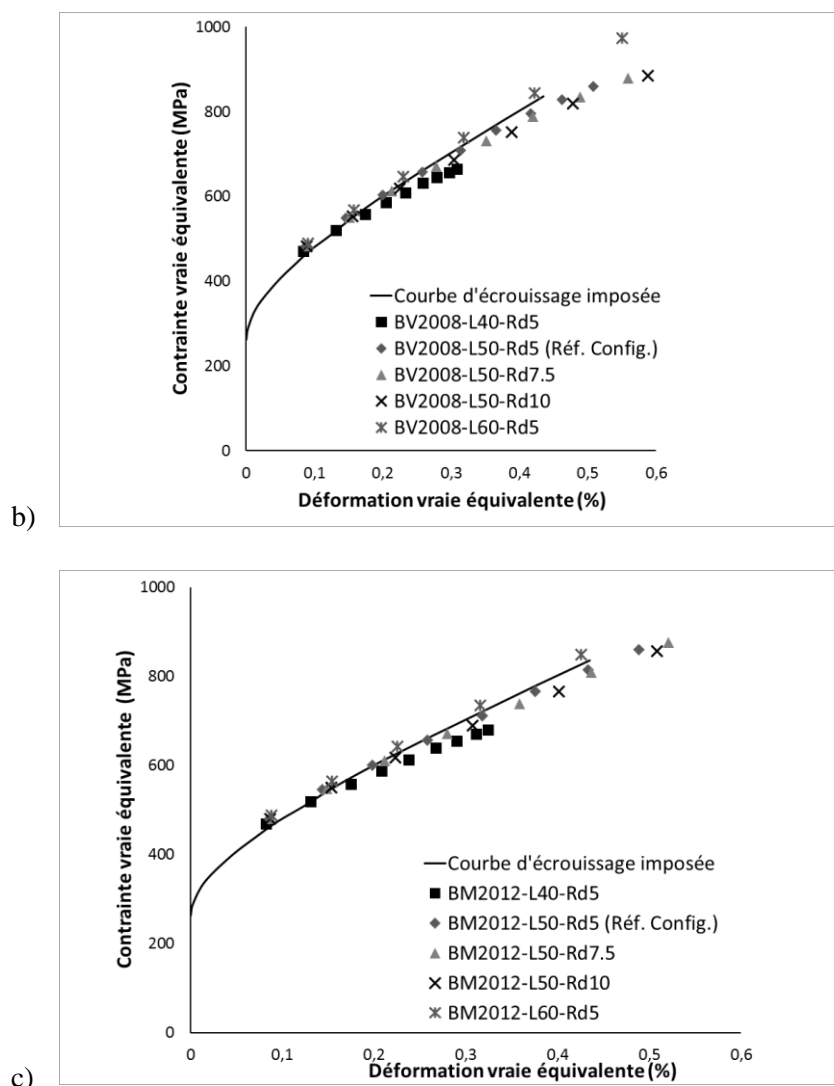


Figure 6 – a) Courbes d'écroissage pour le modèle de Hwang, b) Courbe d'écroissage pour le modèle de Boudeau-Velasco 2008, c) Courbe d'écroissage pour le modèle de Boudeau-Malécot 2012

5 Conclusions

Dans ce papier, trois modèles analytiques permettant de post-traiter les données expérimentales d'un essai de gonflement de tube, dans le but d'obtenir les courbes d'écroissage du matériau, ont été présentés.

A l'aide de simulations numériques, on a pu évaluer l'influence de la configuration du test sur la courbe d'écroissage résultante. Toutes les configurations donnent des résultats proches ; la configuration N°4 ($L=60\text{mm}$ et $Rd=5\text{mm}$) semble toutefois donner des résultats légèrement meilleurs ; elle correspond peut-être à la configuration optimale pour ce test. Il serait souhaitable de réaliser une étude expérimentale pour confirmer ces observations numériques, sachant que la configuration optimale est sans doute en rapport avec les dimensions du tube.

On a également évalué les trois modèles sur leur capacité à post-traiter les résultats du test de gonflement libre de tube (pression, hauteur de gonflement) pour déterminer la courbe d'écroissage des matériaux. Les trois modèles donnent des résultats comparables. Le modèle de Hwang est moins sensible à la configuration du test ; c'est sans doute lié à la construction du modèle qui prend en compte le rayon matrice. Quant au modèle Boudeau-Malécot 2012, bien que très simplifié,

complètement analytique et adapté pour un post-traitement des résultats expérimentaux à l'aide d'un tableur, il donne des résultats très probants et constitue de ce fait un outil parfaitement adapté pour une utilisation en milieu industriel.

Références

- [1] Lang LH, Wang ZR, Kang DC, Yuan SJ, Zhang SH, Danckert J et al. Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming. *J. Mater. Process. Technol* 2004;151:165-77.
- [2] Chu E, Xu Y. Hydroforming of aluminium extrusion tubes for automotive applications. Part II: process window diagram. *Int. J. Mech. Sci* 2004;46:285-297.
- [3] Carleer B, van der Kevie G, de Winter L, van Veldhuizen B. Analysis of the effect of material properties on the hydroforming process of tubes. *J. Mater. Process. Technol* 2000;104:158-166.
- [4] Song WJ, Heo SC, Ku TW, Kang BS. Evaluation of effect of flow stress characteristics of tubular material on forming limit in tube hydroforming process. *Int. J. Machine Tools & Manufact* 2010;50:753-764.
- [5] Hwang YM, Lin YK, Altan T. Evaluation of tubular materials by a hydraulic bulge test. *Int. J. Machine Tools & Manufact* 2007;47:343-351.
- [6] Velasco R, Boudeau N. Tube bulging test: Theoretical analysis and numerical validation. *J. Mater. Process. Technol* 2008;205:51-59.
- [7] Boudeau N, Malécot P. A simplified analytical model for post-processing experimental results from tube bulging test: Theory, experimentations, simulations. *Int. J. Mech. Sci* 2012;65:1-11.
- [8] Hwang YM, Wang CW. Flow stress evaluation of zinc copper and carbon steel tubes by hydraulic bulge tests considering their anisotropy. *J. Mater. Process. Technol* 2009;209:4423-4428.
- [9] Hwang YM, Lin YK. Analysis and finite element simulation of the tube bulge hydroforming process. *J. Mater. Process. Technol* 2002;125-126:821-825.