

Modélisation de l'étirage à froid de tubes par analyse éléments-finis

Muriel Palengat ^{1,2}, Grégory Chagnon ^{2,*}, Christophe Millet ¹, Denis Favier ²

1 Minitubes SA, 21 rue Vaujany, 38100 Grenoble, France

2 Laboratoire 3S-R, UMR CNRS 5521, Universités de Grenoble, BP 53, 38041 Grenoble Cedex 09, France

**Corresponding author: gregory.chagnon@hmg.inpg.fr*

Résumé :

Le procédé d'étirage permet de fabriquer des tubes minces, en réduisant progressivement leur épaisseur ainsi que les diamètres intérieur et extérieur. Dans ce cadre, deux procédés d'étirage à froid sont étudiés avec deux matériaux, un acier austénitique (316LVM) et un acier cobalt (L605). Cette étude aborde différentes problématiques telles que le comportement élastoplastique d'un matériau, les contacts, les frottements et la convergence numérique. Des essais sur banc d'étirage sont réalisés pour enregistrer les efforts et les dimensions. Dans une première approche, des essais de traction quasistatique conduisent à appliquer une loi de comportement élastoplastique avec un écrouissage isotrope. Un modèle statique axisymétrique est utilisé dans les simulations. Finalement, après comparaison des résultats expérimentaux et numériques, cette étude souligne la nécessité d'une meilleure compréhension et modélisation du comportement du matériau, dans des conditions de sollicitations représentatives de celles rencontrées lors de l'étirage.

Abstract:

Drawing process is used in manufacturing thin-walled tubes, while reducing progressively their wall thickness and their inner and outer diameters. In this paper a stainless steel and a cobalt alloy are studied with two cold drawing processes, hollow sinking and plug drawing. This study gets into different issues including elastoplastic behaviour, contacts, friction and numerical convergence. Experimental drawings are realized on a testing bench where forces and dimensional data are recorded. In a first approach, tensile tests lead up to apply an elastoplastic constitutive equation with an isotropic hardening law. In simulations, an axisymmetric steady-state model, with numeric stabilization if needed, is used. Numerical results are compared with experimental data. Finally, in spite of some defaults, this study highlights that finite element modelling is able to foresee accurately the behaviour of a tube during a drawing process. A better understanding and modelling of the mechanical behaviour of materials will improve the FEM simulation results.

Mots-clefs : étirage à froid de tube ; élastoplasticité ; éléments-finis

1 Introduction

Le procédé d'étirage de tubes permet d'obtenir des tubes minces, en réduisant progressivement les diamètres extérieurs et intérieurs ainsi que l'épaisseur. Souvent, les industries développent empiriquement leur production. Ces méthodes conduisent à faire beaucoup d'essais. La simulation numérique est une solution alternative que nous explorons dans cet article. Elle permettra d'examiner la faisabilité des passes et de donner une gamme de production optimisée. Peu de travaux existent sur le procédé d'étirage de tube mais différentes études ont été déjà réalisées pour optimiser les géométries de l'outillage (Um et Lec (1997)) ou pour comparer les efforts et les contraintes de plusieurs procédés d'étirage (Neves *et al.* (2005), Yoshida *et al.* (2001), Yoshida et Furuya (2004)). Karnezis et Farrugia (1998) ont développé un

procédé d'optimisation fondé sur le critère de formabilité de Cockcroft-Latham. Le but de cette étude est de modéliser l'étirage à froid de tube avec une analyse éléments-finis (EF). Deux procédés d'étirage, à creux et sur olive sont étudiés avec un acier inoxydable (316L) et un alliage à base cobalt (L605). Dans une première partie, des expériences d'étirage sur bancs d'essai sont décrites, la deuxième partie détaille les hypothèses de modélisation. Dans une troisième partie, les mesures expérimentales et les résultats prévus par le modèle EF sont comparés et discutés.

1 Essais d'étirage

Des essais d'étirage à creux et sur olive ont été réalisés (Figure 1). L'étirage à creux consiste à faire passer un tube dans une filière de diamètre inférieur au diamètre extérieur de tube. Le procédé d'étirage sur olive est semblable à l'étirage à creux sauf qu'une olive est insérée à l'intérieur du tube pour imposer le diamètre intérieur final. L'olive est fixée à une tige en métal. Des capteurs d'effort enregistrent la force d'étirage et celle appliquée sur l'olive.

Pour chaque matériau, des essais ont été réalisés avec différents diamètres de filières. Les diamètres intérieur (Φ_{int}) et extérieur (Φ_{ext}) du tube initial de 316LVM sont respectivement de 2,00 mm et de 2,37 mm. Pour l'alliage L605, ces diamètres sont respectivement de 1,81 mm et de 2,06 mm. Le procédé comporte un état stationnaire où la force est pratiquement constante. Pour la suite, seul cet état stationnaire sera considéré. On ne tient donc pas compte du début et de la fin de l'étirage. De plus, les extrémités du tube ne sont pas utilisées pour les applications industrielles car elles n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques et géométriques. Les forces d'étirage pendant l'état stationnaire et les dimensions finales du tube ont été enregistrées et sont récapitulées dans le tableau 1 pour l'étirage à creux et dans le tableau 2 pour l'étirage sur olive. Chaque essai a été réalisé deux fois et les résultats sont identiques à moins de 0,01mm près.

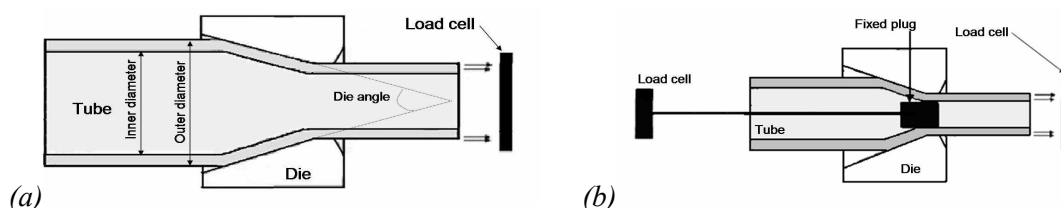


FIG. 1 – Schéma des bancs d'étirage : (a) à creux, (b) sur olive.

Tube Initial mm		2,37×2,00	2,37×2,00	2,37×2,00		2,06×1,81	2,06×1,81	2,06×1,81	2,06×1,81
Tube Final		1,47×1,07	1,70×1,30	1,98×1,60		1,46×1,18	1,49×1,21	1,59×1,31	1,59×1,32
Diamètre Filière mm		1,50	1,73	2,04		1,45	1,50	1,60	1,58
Angle de Filière		25°	25°	25°		25°	25°	25°	14°
Force d'Etirage daN		50	40	25		37	32	26	29

TABLEAU 1 – Mesures expérimentales pour l'étirage à creux.

Matériau	Tube Initial ($\Phi_{ext} \times \Phi_{int}$) mm	Diamètre Filière mm	Diamètre Olive mm	Tube Final ($\Phi_{ext} \times \Phi_{int}$) mm	Force d'étirage daN	Force Olive daN
316LVM	2,37×2,00	1,80	1,50	1,79×1,51	62	12
L605	2,06×1,81	1,60	1,50	1,60×1,49	47	12

TABLEAU 2 – Mesures expérimentales de l'étirage sur olive.

2 Simulation numérique

2.1 Hypothèses

Comme les géométries et les chargements mécaniques sont axialement symétriques, un modèle axisymétrique est employé. Dans une première approche, seul l'état stationnaire est

étudié car il est la phase dominante dans l'étirage de tube. L'étirage de tube implique de grandes déformations. Les phénomènes de plasticité et les frottements produisent de la chaleur mais dans une première approche on suppose que le comportement des matériaux est indépendant de la température. Aussi le modèle ne tient pas compte de la température. De plus, pendant l'étirage, les vitesses de déformation sont de l'ordre de 10 s^{-1} à 100 s^{-1} . Cependant, les essais sont à la température ambiante T (300K), et le point de fusion T_f des alliages étudiés sont supérieurs à 1500K ; vu que le rapport T/T_f est égal à 0,2, les comportements des matériaux sont considérés comme peu sensibles aux vitesses de déformation dans une première approche. Ensuite, les lubrifiants affectent l'étirage mais la lubrification est supposée homogène et constante pendant le processus. Ainsi les variations de la lubrification ne sont pas prises en considération et seul un coefficient de frottement sera employé pour modéliser le frottement. Enfin, une loi de comportement élastoplastique est appliquée pour modéliser le comportement de matériaux. Pour cela, des essais simples sont réalisés.

2.2 Modélisation physique

2.2.1 Comportements des matériaux

Pour analyser le comportement des deux matériaux étudiés (un acier inoxydable (316LVM) et un alliage de cobalt (L605)), seuls les essais de traction sont disponibles pour des tubes minces. Ils sont faciles à réaliser, mais les essais monotones ne sont pas suffisants pour définir correctement la loi d'érouissage. Ainsi, des essais de traction cyclique ont été réalisés pour chaque matériau et les courbes de contrainte-déformation sont rapportées sur la figure 2 (traction jusqu'à environ 700 MPa, décharge jusqu'à contrainte nulle suivie d'une traction jusqu'à rupture). Un retour élastique presque parfaitement linéaire est obtenu pendant la décharge et la courbe de recharge est très proche de la décharge. Ces essais conduisent à appliquer dans une première approche une loi de comportement élastoplastique avec un érouissage isotrope. Pour les deux alliages, le comportement élastique est décrit par le module d'Young (210 GPa) et le coefficient de Poisson (0,3). Le comportement plastique est décrit par un érouissage isotrope identifié point par point par le logiciel ABAQUS sur les courbes de traction de la figure 2.

Les filières sont en diamant (PCD) et les olives sont en carbure de tungstène (WC). Aucune déformation plastique n'a été observée sur les outils et leur limite d'élasticité est élevée. Leur comportement est donc supposé élastique. Les modules d'Young sont 950 GPa et 650 GPa pour le PCD et le WC. Le coefficient de Poisson est 0,2 pour les deux matériaux.

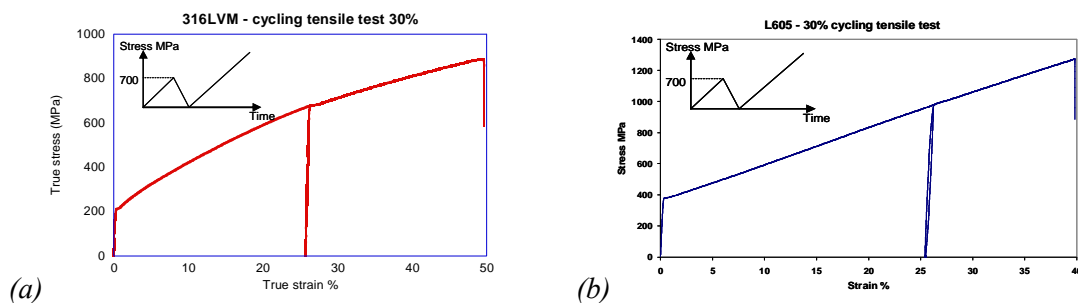


FIG. 2 – Essais de traction cyclique pour les deux matériaux : (a) le 316LVM, (b) le L605.

2.2.2 Frottement

Le frottement dépend de beaucoup de paramètres (matériaux, lubrifiants, surfaces...) et il est difficile à déterminer. Il est modélisé par le coefficient de Coulomb. Ce modèle ne tient pas compte de la fluctuation de la lubrification. Un coefficient de Coulomb sera évalué lors de la

simulation d'un premier étirage expérimental (cf. paragraphe 3) et cette valeur sera utilisée pour toutes les autres simulations.

3 Modélisation numérique

Les conditions aux limites représentant les conditions expérimentales sont exposées sur la figure 3(a). Le tube est étiré à vitesse constante, les effets dynamiques étant négligés dans notre simulation. Les tubes et les olives sont maillés avec des éléments continus axisymétriques à 4 nœuds (CAX4). Afin de s'adapter à la géométrie, le maillage des filières est composé principalement des mêmes éléments quadrilatères mais aussi de quelques éléments triangles (CAX3).

Les étirages à creux de l'alliage 316LVM ont été employés pour identifier un coefficient de frottement. Il a été observé que la force d'étirage dépendait de manière linéaire du coefficient de frottement. La figure 3(b) représente les simulations effectuées pour trois diamètres de filières avec un coefficient de Coulomb égal à zéro puis à 0,25. Le coefficient le plus approprié, pour lequel la force numérique est égale à la force expérimentale, est alors déterminé égal à 0,17.

Ces calculs impliquent des non-linéarités dues aux grandes déformations et aux contacts, qui rendent la convergence difficile. Une stabilisation automatique pour les problèmes statiques peut être utilisée pour faciliter la convergence des calculs pour les calculs d'étirage sur olive.

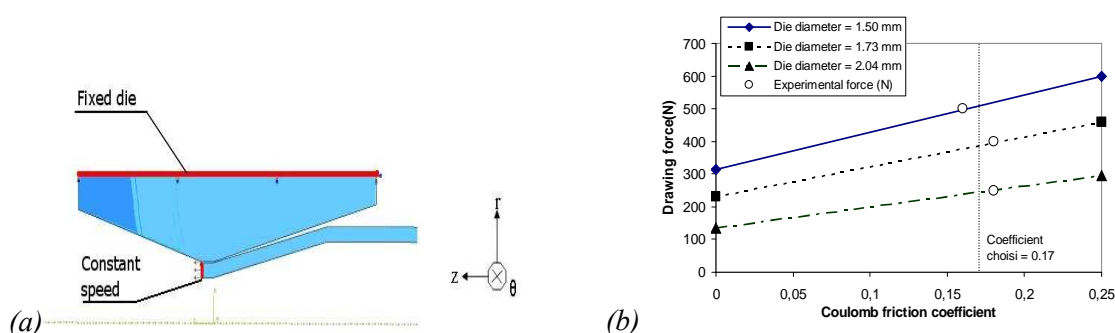


FIG. 3 – Etirage à creux : (a) Conditions aux limites, (b) Identification du coefficient de frottement.

4 Comparaison essais d'étirage-simulation

4.1 Observations

Qualitativement, les mêmes comportements que dans le procédé expérimental sont observés. Tout d'abord, dans l'étirage à creux, le tube se détache de la filière à la sortie de celle-ci. Le détachement peut être observé sur la figure 4(a). Le détachement est de l'ordre de quelques centièmes de millimètre. On remarque aussi que l'épaisseur du tube augmente afin de rendre la réduction de diamètre plus facile. De plus, deux points de compression sur la filière sont visibles sur la figure 4(a). Ils sont situés aux changements de direction du tube et créent de fortes pressions locales dans la filière. Sur les vraies filières, des anneaux d'usure peuvent être observés aux mêmes endroits. Enfin, la figure 4(b) présente l'évolution de la force d'étirage en fonction du temps pendant une simulation d'étirage à creux. On observe trois parties: une augmentation de la force, un état stationnaire et une diminution. Les forces d'étirage sont relevées par la suite pendant l'état stationnaire.

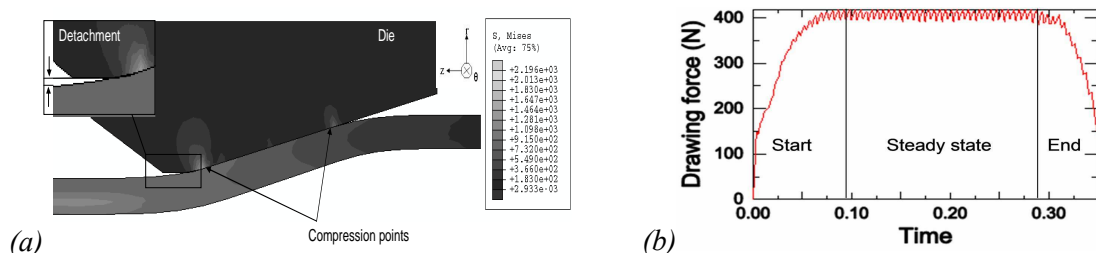


FIG. 4 – Simulation éléments-finis du procédé d'étirage à creux. (a) Contraintes de Von mises, (b) évolution de la force d'étirage en fonction du temps.

4.2 Loi d'écroissage

L'écroissage isotrope a été choisi pour décrire le comportement des matériaux mais les essais de traction ne sont pas suffisants pour être sûrs du type d'écroissage. C'est pourquoi d'autres modèles d'écroissage ont été examinés pour observer l'influence de l'écroissage sur les résultats. Trois modèles d'écroissage ont été appliqués : écroissage isotrope, cinématique linéaire et cinématique non linéaire. Dans chaque cas, trois diamètres de filière sont testés et les dimensions des tubes ($\Phi_{ext} \times \Phi_{int}$) sont notées et comparées aux mesures expérimentales dans le tableau 3. On peut noter que le modèle d'écroissage a une grande influence sur les géométries finales. Pour l'écroissage cinématique, linéaire ou pas, le retour élastique est très important et les dimensions finales de tubes sont loin de celles expérimentales. Il s'avère que l'écroissage isotrope mène aux résultats les plus proches des valeurs expérimentales. Ainsi il semble confirmer le choix d'un écroissage isotrope.

Φ filières (mm)	Mesures expérimentales	Type d'écroissage		
		Isotropique	Cinématique linéaire	Cinématique non linéaire
1,50	1,47×1,07	1,41×1,02	1,73×1,38	/
1,73	1,70×1,30	1,65×1,26	1,94×1,59	1,76×1,39
2,04	1,98×1,58	1,96×1,58	2,02×1,65	2,07×1,69

TABLEAU 3 – Influence du type d'écroissage sur la géométrie d'un tube étiré à creux.

4.3 Comparaison des résultats

L'étirage des tubes de L605 a été modélisé avec les mêmes paramètres que le 316LVM. Comme dans les expériences, les diamètres initiaux intérieurs et extérieurs sont respectivement 1,81×2,06 mm. Tous les résultats sont énumérés dans le tableau 4. Pour chaque étirage, les données prévues par le modèle EF et les mesures expérimentales sont confrontées et l'erreur est notée en pourcentage. Les géométries estimées montrent une bonne corrélation avec les mesures expérimentales. L'erreur moyenne sur les géométries pour l'étirage à creux du L605 est environ 2,8%. Avec une erreur moyenne de 4,8%, la force d'étirage obtenue est également en bon accord avec la réalité. Deux étirages sur olive ont été modélisés, un avec 316LVM et un avec L605. Le coefficient de frottement est encore pris égal à 0,17. La stabilisation est employée pour ces calculs. D'une part, les diamètres des tubes étirés sont égaux aux diamètres des outils, aussi bien dans la simulation que dans les expériences. Les forces appliquées sur l'olive sont

Filière Angle	Filière Diamètre (mm)	Diamètre extérieur (mm)			Diamètre intérieur (mm)			Force d'étirage (daN)		
		Modèle	Essais	Erreur	Modèle	Essais	Erreur	Modèle	Essais	Erreur
25°	1,45	1,400	1,455	3,8%	1,127	1,181	4,6%	36	37	1,4%
25°	1,50	1,452	1,488	2,4%	1,180	1,208	2,3%	33	32	3,1%
25°	1,60	1,550	1,586	2,3%	1,280	1,312	2,4%	28	26	7,7%
14°	1,58	1,556	1,586	1,9%	1,288	1,322	2,6%	31	29	6,9%

TABLEAU 4 – Comparaison entre les résultats prévus par le modèle EF et les mesures expérimentales pour l'étirage à creux du L605.

également correctes. D'autre part la force d'étirage est surestimée par le modèle (Tableau 5). La surestimation de cette force est en moyenne de 17%. Ceci peut être dû à la stabilisation numérique utilisée dans ces calculs ou au coefficient de frottement avec le carbure de tungstène.

Matériau	Force d'étirage (daN)			Force olive (daN)		
	Modèle	Essais	Erreur	Modèle	Essais	Erreur
316LVM	700	625	12%	120	120	0%
L605	580	470	23%	105	100	5%

TABLEAU 5 – Comparaison entre les résultats prévus par le modèle EF et les mesures expérimentales pour l'étirage sur olive.

5 Conclusions

Jusqu'ici, on observe seulement les dimensions et les efforts ; les résultats sont encourageants. Une loi de comportement élastoplastique à écrouissage isotrope est appliquée avec un coefficient de frottement de coulomb de 0,17. Le modèle EF d'étirage à creux est en bon accord avec les mesures expérimentales. Les dimensions prévues par le modèle EF sont également bonnes pour l'étirage sur olive, mais les forces prévues sont surestimées. Cela peut être dû à la détermination du modèle de plasticité des matériaux. Les courbes contrainte-déformation obtenues par les essais de traction sont limitées et ne permettent pas d'analyser entièrement le comportement de matériaux. En effet pendant l'étirage, le matériel subit une traction longitudinale et une compression orthoradiale. Dans l'étirage sur olive, il se superpose une compression radiale, ce qui pourrait expliquer pourquoi les forces prévues par le modèle EF sont moins précises que dans l'étirage à creux. Un essai mieux adapté serait un essai de traction avec de la compression orthoradiale en même temps mais sa réalisation est difficile. Un équivalent de ces deux contraintes est le cisaillement. Sa réalisation est à l'étude pour mieux définir le comportement matériau. En outre, pour les contacts avec le carbure de tungstène, le même coefficient que pour le contact avec le diamant (0,17) a été choisi. Cependant, plusieurs coefficients pour le contact tube-olive ont été examinés et l'influence de ce coefficient de frottement sur la force d'étirage n'a pas été significative. Enfin, la stabilisation numérique est également une source d'erreurs. Elle induit des résultats surestimés, causant une augmentation des efforts. Même si l'énergie absorbée par la stabilisation est vérifiée pour être insignifiante, les forces d'étirage prévues par le modèle EF sur olive sont trop grandes et loin de l'erreur moyenne du modèle d'étirage à creux. Ainsi la surestimation due à la stabilisation doit être mesurée pour connaître son influence sur les résultats.

Références

- Abaqus v.6.6 2006 "21.1.1 Solid (continuum) elements" in *Abaqus Analysis user's manual*.
- Karnezis, P. & Farrugia, D. C. J. 1998 Study of cold tube drawing by finite-element modelling. *J. Mater. Process. Technol.* **80-81**, 690-694.
- Neves, F. O., Button, S. T., Caminaga, C. & Gentile, F. C. 2005 Numerical and experimental analysis of tube drawing with fixed plug. *J. of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng.*, **XXVII**, A, 426-431.
- Um, K. & Lec, D. N. 1997 An upper bound solution of tube drawing. *J. Mater. Process. Technol.* **63**, 43-48.
- Yoshida, K., Watanabe, M., & Ishikawa, H. 2001 Drawing of Ni-Ti SMA fine tubes used in medical tests. *J. Mater. Process. Technol.* **118**, 251-255.
- Yoshida, K., & Furuya, H. 2004 Mandrel drawing and plug drawing of shape-memory-alloy fine tubes used in catheters and stents. *J. Mater. Process. Technol.* **153-154**, 145-150.