

## Modélisation numérique de mise en forme par tréfilage

Guillaume Vega<sup>1,3</sup>, Abdelkader Haddi<sup>2</sup>, Abdellatif Imad<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Mécanique de Lille, CNRS UMR 8107, Ecole Polytech'Lille, Université de Lille1, Cité Scientifique, Avenue Paul Langevin, 59 655 Villeneuve d'Ascq

[Guillaume.vega@polytech-lille.fr](mailto:Guillaume.vega@polytech-lille.fr)

<sup>2</sup> Laboratoire d'Artois de Mécanique, Thermique, Instrumentation, Faculté des Sciences Appliquées, Université d'Artois, Technoparc Futura, 62400 Béthune

<sup>3</sup> NEXANS France, Metallurgy competence centre, Boulevard du marais, BP39, 62301 Lens

### Résumé :

*La modélisation numérique de ce procédé de fabrication permet d'étudier la faisabilité du processus ainsi que la prédiction des défauts qu'il peut générer. Elle prend en compte différentes non linéarités (élastoplastique, contacts), les caractéristiques des configurations intermédiaires et finales du produit (trajectoires des points matériels, répartition des déformations et contraintes résiduelles) et les sollicitations et conditions géométriques.*

*Les paramètres du modèle sont identifiés à partir d'essais de caractérisation sur une machine de tréfilage. Ce modèle est implanté dans un code EF développé pour simuler l'écoulement du fil à travers la filière.*

*Des exemples numériques sont présentés pour différentes géométries de filière de tréfilage. Des éléments de contact sont utilisés pour modéliser le frottement fil – filière. L'analyse des résultats montre, en considérant l'effet d'écrouissage, l'influence de la géométrie de la filière sur la distribution de contraintes et sur la qualité du fil. Les résultats obtenus sont en concordance avec les essais expérimentaux.*

### Abstract :

*The numerical modelling of wiredrawing allows to improve the process and to study the prediction of the defects .Then, different analytical, numerical, experimental methods have been developed in order to analyse it and to optimise it. However, exact solutions have not achieved yet due to the great number of factors and to the mathematical complexity that they present. In this work, the main variants of the drawing process have been studied by different methods. Concretely, wire drawing have been modelled and simulated by means of analytical method and finite element method.*

*Numerical examples are presented for various geometries of die. Elements of contact are used to model friction wire - die. The analysis of the results shows, by considering the hardening effect, the influence of the die geometry on the distribution of stresses and the wire quality. The results obtained are in agreement with those obtained by the experimental tests.*

**Mots-clefs : Mise en forme par tréfilage, essais expérimentaux, modélisation**

### 1 Introduction

Le tréfilage, qui est un procédé de mise en forme à froid couramment utilisé dans le secteur électrique, consiste à étirer un fil, en plusieurs passes, en réduisant progressivement son diamètre à travers des filières (Figure 1), sous l'action d'une traction continue. Ainsi, le fil subit de fortes déformations qui modifient notablement ses propriétés mécaniques. Lors du tréfilage multipasses le fil est constamment soumis à une force de traction accompagné d'un frottement avec la filière. L'ensemble est immergé (ou arrosé) dans un bain d'huile ou d'émulsion d'huile qui joue le rôle de lubrifiant et d'échangeur thermique. Ces paramètres ont une influence majeure sur la qualité finale des fils d'une part et sur l'endommagement des filières d'autre part. De même, les paramètres géométriques jouent un rôle primordial dans l'opération de tréfilage. La figure 1 donne les éléments géométriques couramment utilisés dans le procédé de tréfilage et met en évidence trois zone principales : Zone I admission du lubrifiant ; Zone II cône de travail

et Zone III portée calibrante. Globalement, la qualité du tréfilage dépend de plusieurs paramètres extrinsèques au matériau à tréfiler, nous citons entre autres : le demi angle du cône de travail,  $\alpha$ , le taux de réduction  $r=1-\frac{R_f^2}{R_i^2}$ , la portée calibrante  $P$ , le coefficient de frottement à l'interface fil - filière  $\mu$ , la contre traction  $\sigma_b$  due au cabestan de tirage précédent et la contrainte de tréfilage  $\sigma_f$ .

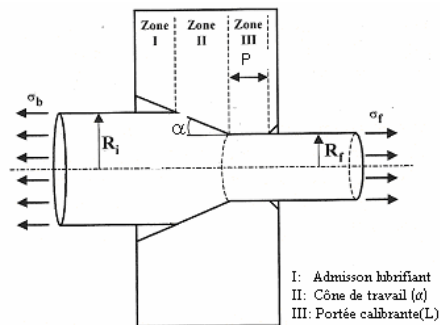


FIG. 1 – Schématisation des zones de tréfilage. Définitions géométriques.

Depuis les travaux de Smith (1886) portant sur le flux du métal lors du tréfilage, plusieurs investigations expérimentales, analytiques et numériques ont été menées pour étudier ce procédé.

Siebel (1947) considère que les déformations subies par le fil lors du tréfilage résultent essentiellement de trois composantes : Une déformation homogène (dépendant essentiellement de la réduction de section dans la partie calibrante), une déformation hétérogène (dépendante de la géométrie) et d'une contribution des effets de frottement. A partir de cette décomposition, l'auteur propose une formulation analytique pour décrire l'évolution de la contrainte de tréfilage  $\sigma_f$  en fonction des paramètres géométriques  $\alpha$ ,  $R_i$ ,  $R_f$ , du coefficient de frottement  $\mu$  et de la moyenne des contraintes d'écoulement plastique avant et après la filière,  $\sigma_0$ , pour prendre en compte l'érouissage du matériau, qui est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_0} = \ln\left(\frac{R_i}{R_f}\right) + \mu \cot \alpha \ln\left(\frac{R_i}{R_f}\right) + \frac{2\alpha}{3} \quad (\text{Eq. 1})$$

A partir de résultats expérimentaux dans le cas du tréfilage, Wistreich (1955) a modifié le modèle de Siebel. L'auteur propose une simplification de ce modèle en négligeant la composante liée à une déformation hétérogène et en introduisant une fonction  $\Phi$  pour prendre en compte les pertes supplémentaires par frottement interne et par cisaillement du métal, due à l'inclinaison provisoire des fibres du métal lors de son passage dans la filière ( $\Phi > 1$ ). Ces hypothèses conduisent à l'équation suivante :

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_0} = \Phi(1 + \mu \cot \alpha) \ln\left(\frac{R_i}{R_f}\right) \quad (\text{Eq. 2})$$

Pour sa part, Avitzur (1971) a entrepris une approche expérimentale pour déterminer l'effort de tréfilage en fonction du taux de réduction, de la valeur du cône de travail et du frottement. L'auteur complète les travaux de Siebel en proposant un terme complémentaire pour tenir compte du travail redondant (effet de contre traction). Avitzur (1983) complète le modèle de Siebel, en analysant les différentes énergies contribuant à la déformation. Ainsi, les puissances mises en jeu dans le processus de tréfilage sont les suivantes :

- la puissance appliquée due à l'effort d'étrépage :  $W_f$
- la puissance due à la tension dans le fil à l'entrée de l'outil (back drawing force) :  $W_b$
- la puissance due à la déformation plastique interne :  $W_i$
- la puissance due aux pertes par frottement :  $W_s$

En écrivant l'équilibre des puissances de la façon suivante :  $W_s + W_b + W_i - W_f = 0$  ; l'auteur propose une relation de dépendance entre l'effort d'étirage  $\sigma_f$  et les différentes variables du processus suivante :

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_0} = \left[ 1 + 2\mu \frac{P}{R_f} \right]^{-1} \left[ \frac{\sigma_b}{\sigma_0} + 2f(\alpha) \ln \left( \frac{R_i}{R_f} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + 2\mu \left( \cot(\alpha) \left( 1 - \frac{\sigma_b}{\sigma_0} - \ln \left( \frac{R_i}{R_f} \right) \right) \ln \left( \frac{R_i}{R_f} \right) + \frac{P}{R_f} \right) \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

La valeur de cet effort de tréfilage résulte d'une contribution incompressible (contrainte en entrée, déformation plastique interne, frottements internes à l'entrée et la sortie de la filière) et d'une contribution de frottement à l'interface qui varie en fonction de la loi de frottement (ici, loi de Coulomb). En appliquant cette technique à un matériau écrouissable (coefficient d'écrouissage linéaire), l'auteur (Avitzur (1983)) analyse la formation de décohésions internes (cup and cone) dans les barres et le fil extrudés.

Ce travail consiste à étudier l'influence de la géométrie interne des filières et des paramètres liés au procédé (frottement, taux de réduction) sur l'effort de tréfilage et l'écoulement du métal dans le cas de la mise en forme d'un fil en cuivre réalisé à l'aide d'une machine instrumentée, en utilisant deux types de filières différentes. La capacité des trois modèles analytiques, présentés ci-dessus, à décrire l'évolution de l'effort de tréfilage en fonction de l'angle de travail  $\alpha$ , de la portée  $P$ , et du coefficient de frottement  $\mu$ , est vérifiée. De même, une simulation numérique par éléments finis est réalisée pour modéliser la déformation d'un fil au travers une filière. Une comparaison entre les résultats expérimentaux, l'approche analytique et la simulation numérique, est proposée pour optimiser les paramètres du procédé.

## 2 Etude expérimentale

Une machine de tréfilage mono fil à glissement est utilisée pour réaliser le tréfilage d'un fil de cuivre au travers de filières de différentes géométries. Un fil de cuivre initialement recuit de diamètre 0.513 mm est tréfilé à un diamètre 0.403mm (soit une réduction  $r=0.375$ ) à une vitesse de 1m/s.

Deux types de filières, noyau en Diamant Mono cristallin (MD), ou Diamant Poly Cristallin (PCD), sont utilisés de façon à mettre en évidence l'influence des conditions d'interface (frottement). Un système de mesure laser (Conoptica) permet d'obtenir les valeurs des géométries internes des filières, synthétisées dans le tableau 2. Les différents essais sont menés pour un angle de travail  $2\alpha$ , variant de 14.75 à 19.05 degrés et deux valeurs de portée, 25 et 40% du diamètre final. La lubrification s'effectue par immersion dans de l'huile entière. L'effort de tréfilage, mesuré avec une jauge de déformation, varie de 35 à 41 N pour les différentes configurations étudiées.

Diamètre [mm]	0.405							
Matière filière	MD	MD	MD	MD	PCD	PCD	PCD	PCD
Portée [% diamètre]	25	25	40	40	25	25	40	40
$2\alpha$ [°]	14.90	16.85	15.60	19.05	15.05	18.45	14.75	17.25
<b>Effort F [N]</b>	<b>35</b>	<b>37</b>	<b>35</b>	<b>34</b>	<b>41</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>41</b>

TABLEAU 2 – Effort de tréfilage en fonction des paramètres.

Afin de caractériser le matériau utilisé, nous avons effectué des essais de traction monotone sur un fil de cuivre Ø0.513 mm à différentes vitesses de traction : 0.5, 10, 20 mm/min (Fig. 5).

### 3 Résultats et comparaison avec les formulations analytiques

Les équations 1, 2 et 3 permettent de déterminer l'effort de tréfilage en fonction de l'angle du cône de travail, les autres paramètres étant fixes. Pour deux valeurs de portées  $P=25$  et  $40\%$ , les figures 2 et 3 montrent la variation de cet effort de tréfilage pour les différentes formulations proposées par Wistreich, Siebel et Avitzur (Eq 1, 2, 3), avec la moyenne des contraintes d'écoulement plastique déterminé à partir des essais de traction,  $\sigma_0 = 300\text{MPa}$ .

Le calcul avec un coefficient de frottement  $\mu$  compris entre 0.1 et 0.2, qui correspond à l'intervalle des valeurs couramment observées dans le cas du type de lubrification utilisée, permet d'encadrer nos valeurs obtenues expérimentalement. Celles-ci semblent s'inscrire correctement dans les courbes analytiques malgré le fait que les angles  $\alpha$  choisis soient proches ( $\alpha=7.5^\circ$  à  $9.5^\circ$ ). Il est à noter que, pour une configuration donnée ( $P=40\%$  par exemple), l'effort de tréfilage est supérieur pour des filières constituées en poly cristallins (PCD) qu'en diamant (MD) ( $\mu_{\text{PCD}} > \mu_{\text{MD}}$ ).

L'effort de tréfilage en fonction de l'angle de travail  $\alpha$ , passe par un minimum, qui dépend des différents paramètres ( $\mu$ ,  $r$ ,  $\alpha$ ). Pour nos résultats expérimentaux obtenus dans cette étude, les paramètres choisis correspondant aux spécifications industrielles usitées pour le tréfilage du cuivre, sont proches des conditions minimisant l'effort.

Les figures 2 et 3 montrent clairement que la longueur de la portée  $P$  (25 et 40%) a peu d'influence sur la variation de l'effort de tréfilage.

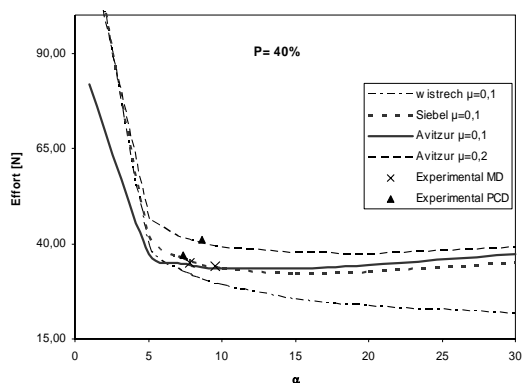


FIG. 2 – Effort de tréfilage  $P=40\%$   
Comparaison expérimental – analytique

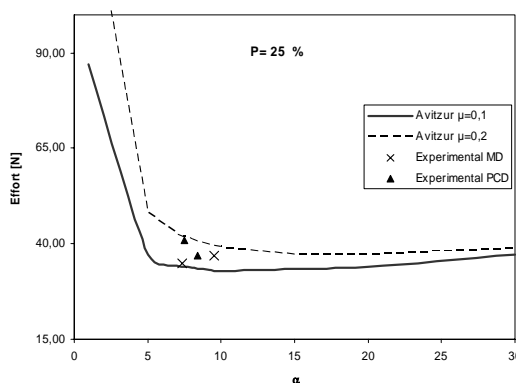


FIG. 3 – Effort de tréfilage  $P=25\%$   
Comparaison expérimental – analytique

### 4 Etude numérique

Le code EF ANSYS 10.0, un programme basé sur une formulation quasi statique avec intégration implicite est utilisé. Pour une coupe axisymétrique du fil, plusieurs simplifications peuvent être faites. Les géométries du fil et de la filière sont décrites par la figure 4, dans le plan x-y, des éléments axisymétriques sont utilisés pour décrire le problème 3D initial, en 2D. Le fil est modélisé pour chaque géométrie avec 10 éléments le long du rayon. Les filières sont considérées comme des corps rigides. Un coefficient de friction  $\mu$  est supposé constant pour tous les contacts fil-filière. La figure 5 montre les essais de traction réalisés à différentes vitesses et la loi de comportement élastoplastique utilisée, obtenue à partir d'essais de traction du fil ( $\varnothing 5.13\text{mm}$ ) qui est décrit par l'équation suivante :  $\sigma = \sigma_0 + K(\varepsilon_p)^n$ , avec  $\sigma_0=166\text{MPa}$ ,  $K=484$ ,  $n=0.82$ .

Le tréfilage met en jeu de fortes vitesses de déformations. Ainsi, pour prendre en compte les différentes vitesses de déformations, nous avons utilisé un modèle viscoélastoplastique du type Perzyna :

$$\sigma_y = \sigma_0 \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{\gamma} \right)^m \right]$$

avec  $\sigma_y$  contrainte d'écoulement ;  $\dot{\epsilon}_p$  : taux de déformation plastique équivalente ; m coefficient d'écrouissage (m=0.737),  $\gamma$  paramètre de viscosité du matériau ( $\gamma=2.3$ ).

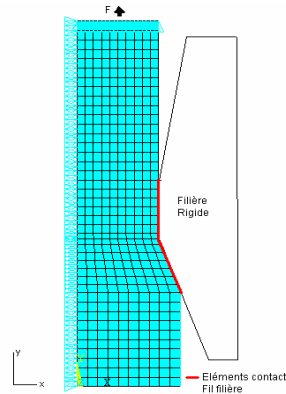


FIG. 4 – Maillage et conditions aux limites

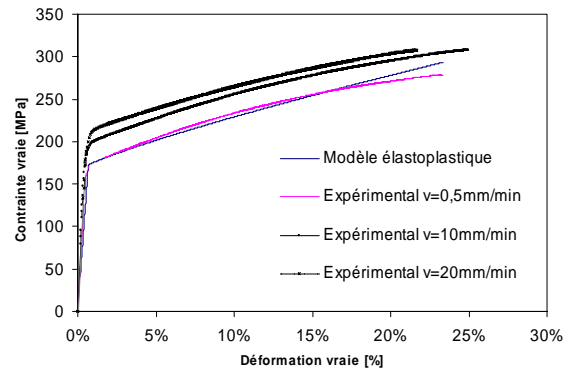


FIG. 5 – Courbes de traction

### 5 Comparaison avec la simulation numérique

La figure 6 montre une comparaison entre les résultats expérimentaux et l'effort de tréfilage en fonction de l'angle du cône de travail calculé numériquement dans la configuration P=40% et  $r = 0.375$  et pour différentes valeurs de  $\mu$  (concrètement  $\mu=0.01, 0.05$  et  $0.15$ ). La convexité de la courbe de la variation de l'effort de tréfilage, attendue par les modèles analytiques, est moins marquée pour des taux de réduction importants (ici  $r=0.375$ ).

Cette courbe permet la validation de la modélisation numérique utilisée dans cette étude. Néanmoins, il serait nécessaire d'effectuer une modélisation plus réaliste du matériau en intégrant des modèles d'endommagement continu (type Gurson).

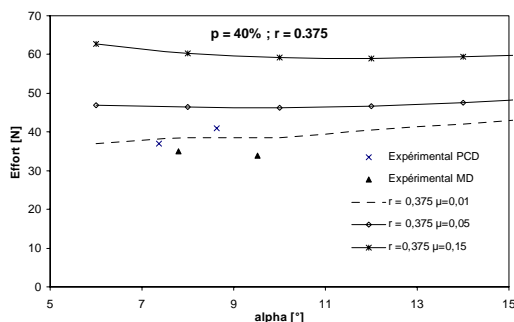


Fig. 6 – Effort de tréfilage : Comparaison résultats expérimentaux et résultats de simulation numérique ( $\mu=0.01, 0.05, 0.15$ )

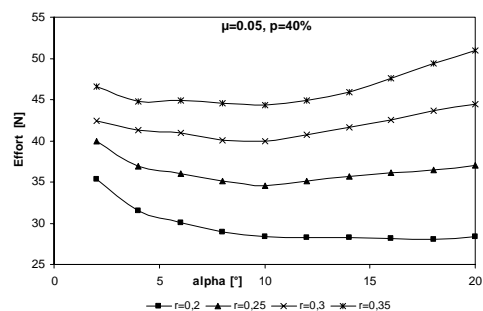


FIG. 7 – Effort de tréfilage : Simulation numérique pour différents taux de réduction

La figure 7 montre l'évolution de l'effort de tréfilage obtenu numériquement pour  $\mu=0.05$  et P=40%, en faisant varier le taux de réduction r de 0.2 à 0.35. On constate que plus la valeur du taux de réduction diminue plus on retrouve la convexité de la courbe, qui peut s'expliquer par la répartition des contributions énergétiques : Pour une valeur de  $\alpha$  faible,

l'énergie dissipée par les frottements est prépondérante, tandis que pour une valeur de  $\alpha$  élevée, la majeure contribution à l'effort de tréfilage est attribuée à l'énergie de déformation. Pour des valeurs importantes de  $r$ , l'énergie dissipée par le frottement devient négligeable devant l'énergie de déformation quelque soit la valeur de  $\alpha$ , ce qui explique la perte de convexité de la courbe.

## 6 Conclusion

Cette étude a permis la détermination de l'évolution de l'effort de tréfilage en fonction des différents paramètres liés au procédé à partir d'une étude expérimentale, d'une formulation analytique et d'une méthode numérique basée sur la méthode des éléments finis. Néanmoins, il serait nécessaire d'effectuer une modélisation plus réaliste du matériau en intégrant des modèles d'endommagement continu (type Gurson).

Une première série de relations entre la géométrie de la filière et l'optimisation de la déformation pendant le tréfilage a été obtenue. L'application de la méthode numérique à différents types de situations permettra d'évaluer les meilleures conditions (profils et forme de filières, taux de réduction...) pour un procédé industriel optimisé.

## Remerciements :

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un contrat CIFRE de collaboration entre le Laboratoire de Mécanique de Lille (LML) et la société NEXANS France. Nous tenons à remercier MM DEBLADIS F., SAUREL M. de la Société NEXANS (Metallurgy competence centre) pour leur support technique et industriel.

## Références

- Avitzur, B., 1979, Metal forming: processes and analysis, McGraw-Hill series, 1968, Krieger, revised 1979.
- Avitzur, B., 1983, Flow through conical converging dies, Handbook of metal forming, John Wiley & Sons, Inc., NY chap3 March 1983, pp 1020.
- Siebel E., 1947, Stahl u. Eisen , 66/67, p171
- Smith, O, 1886, Flow of metals in the drawing process, J. Franklin Inst., 122, 321-346; 123,232.
- Wistreich J.G., 1955, Investigation of mechanics of wire drawing, Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 169, pp 654-670.
- Wistreich J.G., 1958, The fundamentals of Wire Drawing, Metallurgical reviews., Vol. 3, No 10 pp 97-142.