

# Une méthode d'identification de la rhéologie du métal et du lubrifiant lors du tréfilage

Carole Levrau, Eric Felder, Marc Mantel, Nguyen Truong Dinh

## ► To cite this version:

Carole Levrau, Eric Felder, Marc Mantel, Nguyen Truong Dinh. Une méthode d'identification de la rhéologie du métal et du lubrifiant lors du tréfilage. 40ème colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie, Oct 2005, Nice, France. 4 p. hal-00578642

HAL Id: hal-00578642

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00578642>

Submitted on 21 Mar 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Une méthode d'identification de la rhéologie du métal et du lubrifiant lors du tréfilage

C. Levrau<sup>1</sup>, E. Felder<sup>1</sup>, M. Mantel<sup>2</sup> et N. Truong Dinh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CEMEF, UMR 7635 du CNRS, Ecole des Mines de Paris BP 207 F 06904 Sophia-Antipolis France  
carole.levrau@ensmp.fr

<sup>2</sup> UGITECH, Centre de Recherches, Avenue Paul Girod 73403 Ugine Cedex France  
marc.mantel@ugitech.arcelor.com

<sup>3</sup> CONDAT, Avenue Frédéric Mistral BP16 38670 Chasse sur Rhône France  
nguyen.truongdinh@condat.fr

**Résumé :** Nous montrons comment l'analyse thermomécanique élémentaire d'une passe de tréfilage et la mesure de la force et d'une température de filière pour divers lubrifiants permettent d'identifier le travail de déformation plastique lié à la réduction du fil, ainsi que les cissions de frottement relatives aux lubrifiants utilisés. Nous présentons le protocole expérimental et discutons la relation entre la formulation des lubrifiants et le frottement estimé.

**Mots-clés :** Tréfilage, Lubrifiant, Savon, Température de filière, Frottement

## 1. Introduction

Le tréfilage est un procédé de mise en forme à froid des métaux qui consiste à réduire le diamètre d'un fil en le tirant à travers l'orifice calibré de la filière, en présence d'un lubrifiant. Les équipements industriels sont constitués de plusieurs filières et permettent de tréfiler à des vitesses comprises entre 1 et 20 m/s. Le fil est donc soumis à de sévères sollicitations, mécaniques et thermiques, qui peuvent conduire à des rayures, voire des casses si la lubrification n'est pas adaptée. En tréfilage à "sec", ce sont des savons qui sont utilisés : il s'agit de corps pulvérulents composés d'une matière grasse (issue de la réaction de saponification) et de charges minérales. Dans la pratique industrielle, ce sont des stéarates de sodium et de calcium chargés qui sont utilisés. Leur formulation est très importante puisqu'elle va conditionner leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques (consistance) et, par ce biais, leurs performances au cours du tréfilage, c'est-à-dire leur aptitude à former un film homogène et suffisamment épais (quelques micromètres) pour s'intercaler entre le fil et la filière et éviter toute interaction indésirable entre les deux antagonistes [1]. L'étude de l'interface fil/filière permet d'aborder cet aspect tribologique, via l'estimation d'un coefficient de frottement ou encore l'analyse de la surface des fils et de la filière [2]. Nous disposons pour cela de moyens tels que la rugosimétrie et la microscopie, qui sont deux techniques permettant de visualiser la topographie de la surface. Le frottement peut quant à lui être estimé à partir de modèles analytiques ou numériques de tréfilage, à condition de disposer d'un certain nombre d'informations, notamment la

rhéologie du métal étudié. Ici, nous proposons une méthode originale de mesure du frottement, via l'estimation des contraintes de cisaillement, ou cissions, à l'interface métal-savon. Elle repose sur la mesure de la force de tréfilage et d'une température de filière, interprétées par un modèle analytique basé sur la méthode des tranches.

## 2. Analyse thermomécanique d'une passe de tréfilage

### 2.1 Contrainte de tréfilage

La Figure 1 représente de manière schématique une passe de tréfilage et toutes les grandeurs caractéristiques associées.

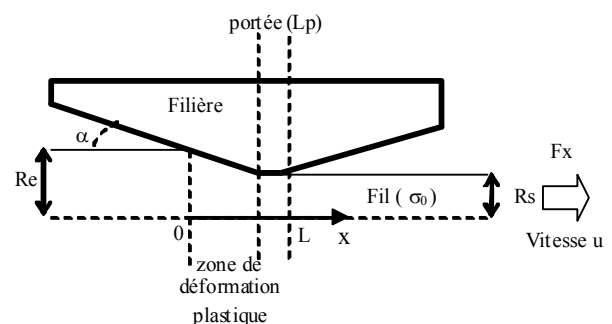


Fig. 1 : Schéma d'une passe de tréfilage et grandeurs caractéristiques

En utilisant la méthode des tranches [3], nous pouvons exprimer la contrainte de tréfilage sous la forme :

$$\sigma = \frac{F_x}{\pi R_s^2} = \Psi \cdot \bar{\sigma}_0 \cdot \ln \lambda + \tau \left( \cotan \alpha \cdot \ln \lambda + \frac{2 L_p}{R_s} \right) \quad (1)$$

Où  $F_x$  est la force de tréfilage;  $R_e$  et  $R_s = R_e - \Delta R$  les rayons d'entrée et de sortie du fil;  $\bar{\sigma}_0$  la contrainte d'écoulement moyenne du fil;  $\lambda$  l'allongement du fil

tel que  $\lambda = \left(\frac{R_e}{R_s}\right)^2$ ;  $\Psi \geq 1$  le travail redondant qui

prend en compte les hétérogénéités de déformation entre le coeur et la surface du fil [4];  $\tau$  la cission de frottement moyenne;  $L_p$  la longueur de la portée de la filière.

## 2.2 Echauffement du fil

La température superficielle du fil  $\Delta T_s$  est imposée par sa température initiale  $T_i$ , par la déformation plastique (échauffement  $\Delta T_{def. plast.}$ ) et par le frottement sur la filière (échauffement  $\Delta T_{frottement}$ ). L'évolution de la température à cœur du fil peut être estimée en supposant le procédé adiabatique et en négligeant la conduction thermique. Nous avons alors [5] :

$$\Delta T_{def. plast.} = \frac{\int_0^{\ln \lambda} \sigma_0 \cdot d\bar{\varepsilon}}{\rho C} = \frac{W_{pl}}{\rho C} \quad (2)$$

$\rho$  est la masse volumique du fil,  $C$  la capacité calorifique du fil,  $\bar{\varepsilon}$  la déformation plastique du fil et  $W_{pl}$  le travail de déformation plastique d'un volume unité du fil. A l'interface fil/filière, de longueur  $L = L_p + \Delta R/\sin \alpha$ , nous devons considérer le frottement entre les deux antagonistes et l'extraction de chaleur par la filière. Pour décrire la distribution de température perturbée, nous utilisons un modèle de type parabolique, qui permet d'estimer avec une bonne approximation la variation de la température superficielle  $\Delta T_{frottement}$  le long de la zone de déformation [6] :

$$\Delta T_{frottement} = \left( \frac{3}{2} \frac{\phi}{b_f^2} \int_0^t \phi dt \right)^{1/2} \quad (3)$$

où  $b_f$  est l'effusivité thermique du fil,  $t \approx x/u$  est le temps de glissement,  $x$  la distance axiale à l'entrée et  $u$  la vitesse de tréfilage (Fig. 1). Le flux superficiel  $\phi$  est de la forme  $\phi = \tau u - \phi_F$ .

Nous supposons, dans une première approximation, que  $u$  et  $\tau$  sont constants au cours d'une passe.  $\phi_F$  est le flux extrait par la filière et vaut :

$$\phi_F = 3K_F \left( \frac{\bar{T}_s - T_F}{L} \right) \quad (4)$$

$K_F$  est la conductivité thermique de la filière,  $\bar{T}_s$  est la température moyenne d'interface,  $T_F$  est la température du rayon extérieur de la frette de la

filière (imposée par l'eau de refroidissement). La température moyenne d'interface  $\bar{T}_s$  est calculée au moyen d'une intégrale simple:

$$\bar{T}_s = \frac{1}{L} \int_0^L T_{(x)} \cdot dx \quad (5)$$

On en déduit, en linéarisant le terme lié à la déformation plastique, que l'échauffement superficiel final du fil est (en  $x = L$ ):

$$T_s = T_i - \left( T_i - T_F + \frac{\bar{\sigma}_0}{\rho C} \left( \frac{\Delta R}{R_e} \right) \right) \left( \frac{2}{3} + \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{b_f L}{3K_F} \sqrt{\frac{u}{L}} \right)^{-1} + \frac{\bar{\sigma}_0}{\rho C} \left( \frac{2\Delta R}{R_e} \right) + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\tau \sqrt{uL}}{b_f} \left( 1 + 3 \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{K_F}{b_f L} \sqrt{\frac{L}{u}} \right)^{-1} \quad (6)$$

Nous retrouvons dans cette expression les échauffements superficiels du fil générés par la déformation plastique (2<sup>e</sup> terme) et par le frottement (3<sup>e</sup> terme) et diminués par le flux extrait par la filière (facteur du 3<sup>e</sup> terme). Dans notre cas, nous considérons que le premier terme est négligeable devant le second, ce qui nous amène à écrire que l'échauffement final de la surface du fil  $\Delta T_s$  est :

$$T_s - T_i = \Delta T_s = \frac{\sigma_0 \bar{\varepsilon}}{\rho C} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\tau \sqrt{uL}}{b_f} \alpha(u) \quad (7)$$

$$\text{avec } \alpha(u) = \left( 1 + \sqrt{6} \frac{K_F}{b_f L} \sqrt{\frac{L}{u}} \right)^{-1}$$

## 2.3 Modèle thermomécanique utilisé

L'analyse mécanique et thermique a permis d'écrire que la contrainte de tréfilage et l'échauffement superficiel final du fil sont deux fonctions linéaires du travail de déformation plastique  $W_{pl}$  et de la cission de frottement  $\tau$  (Eqs. (1) et (7)):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= W_{pl} + a_1 \cdot \tau \\ \rho C \Delta T_s &= W_{pl} + b_1 \sqrt{u} \cdot \alpha(u) \cdot \tau \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\text{sachant que } a_1 = \ln \lambda \cdot \cotan \alpha + \frac{2L_p}{R_s} \text{ et } b_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{L}{a_f}}$$

où  $a_f$  est la diffusivité thermique du fil.

La combinaison de ces deux relations fournit :

$$\sigma_x = W_{pl} \left( 1 - \frac{a_1}{b_1 \cdot \alpha(u) \cdot \sqrt{u}} \right) + \left( \frac{a_1 \cdot \rho C}{b_1 \cdot \alpha(u) \cdot \sqrt{u}} \right) \Delta T_s \quad (9)$$

Ce modèle théorique indique que la contrainte, pour diverses conditions de frottement, est une fonction linéaire croissante de l'échauffement maximal

superficiel du fil. Les distributions étant de forme fixe, nous pouvons ajouter que toute mesure de température locale dans la filière  $\Delta T_{mesurée}$  est proportionnelle à  $\Delta T_s$ . Nous écrivons alors que :

$$\Delta T_s = \beta' \Delta T_{mesurée}$$

Le report de cette relation dans l'expression (9) indique alors que la contrainte de tréfilage est également fonction linéaire croissante de toute mesure locale de température. A partir d'une représentation graphique  $\sigma = f(\Delta T_{mesurée})$  pour divers lubrifiants et des valeurs numériques des différents paramètres liés au fil et à la filière, nous pouvons alors estimer les valeurs de  $W_{pl}$ ,  $\beta'$ , puis celles des cissions de frottement  $\tau$  (Fig. 2).

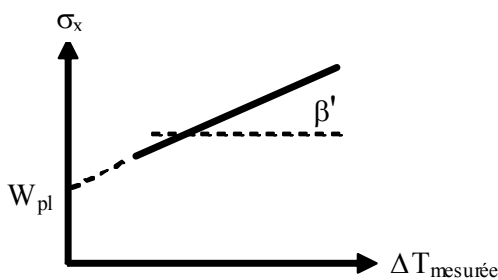


Fig. 2 : Détermination de  $W_{pl}$  et  $\beta'$  à partir des mesures de la contrainte de tréfilage et de la température en un point de la filière avec différents lubrifiants.

### 3. Essais de tréfilage

#### 3.1 Dispositif expérimental

Des essais de tréfilage ont été réalisés sur une tréfileuse mono-passe au Centre de Recherches d'Ugine, dans les conditions suivantes :

- vitesse  $u = 1$  m/s,
- fil tréfilé : acier inoxydable austénitique de diamètre initial  $2R_e = 2,2$  mm,
- lubrifiants : 2 stéarates de sodium (savons sodiques) à faible/fort taux de charges et 1 stéarate de calcium chargé (savon calcique),
- filière : "percée", de noyau en WC-Co,  $2R_s = 1,85$  mm, réduction de section 30 % (soit  $\lambda = 1,428$ ), angle  $2\alpha = 16^\circ$ , longueur de portée égale au 1/3 du diamètre du fil en sortie.

Lors des essais, les forces de tréfilage ainsi que deux températures de filière sont mesurées. Pour cela, les outils utilisés sont percés de manière à introduire des thermocouples (diamètre 1 mm) et mesurer les températures locales moyennes lors de la réduction du fil, à l'interface frette/noyau et à proximité de l'interface noyau/fil (Fig. 3). Les campagnes d'essais réalisées nous ont permis de constater que les deux températures  $T_1$  et  $T_2$  étaient bien, comme prévu, systématiquement des fonctions linéaires l'une de

l'autre. Nous donnons un exemple de cette linéarité sur la Figure 4.

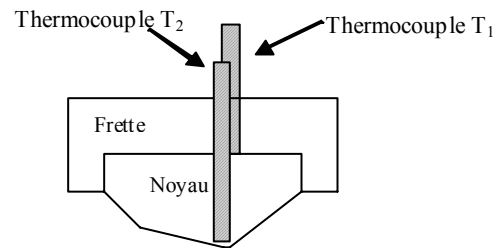


Fig. 3 : Instrumentation des filières de tréfilage pour la mesure de températures

L'alignement des points expérimentaux indique que les thermocouples sont bien stables dans leur emplacement au cours d'une série d'essais et qu'une seule mesure de température est suffisante pour calculer la seconde. Par la suite, pour faciliter l'usinage de telles filières, nous n'avons conservé qu'un seul perçage (mesure de  $T_2$ ).

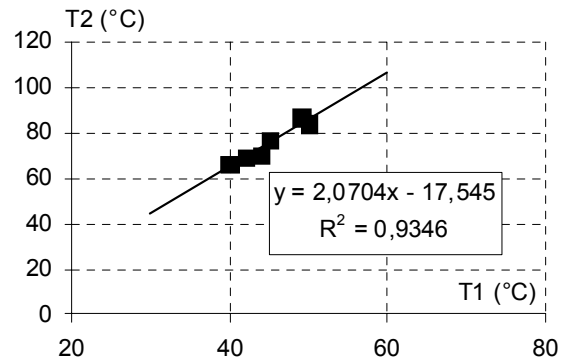


Fig. 4 : Résultats des mesures des températures  $T_1$  et  $T_2$  obtenues avec différents savons commerciaux [fil  $2R_e = 2,2$  mm – filière  $2R_s = 1,85$  mm/16° -  $u = 1$  m/s]

#### 3.2 Résultats

Pour vérifier la pertinence de notre modèle thermomécanique, nous avons représenté l'évolution des contraintes de tréfilage (calculées à partir des mesures de forces) en fonction des échauffements de filière (calculés en retranchant la température initiale de la filière aux mesures des thermocouples). Les résultats obtenus dans les conditions citées précédemment sont présentés sur la Figure 5. L'alignement des points est satisfaisant puisque cela confirme les prévisions de notre modèle, à savoir que la contrainte de tréfilage est une fonction linéaire croissante des échauffements mesurés localement dans la filière. L'identification des paramètres  $W_{pl}$  et  $\beta'$  à partir de l'équation de droite, comme décrit au paragraphe 2.3, nous donne  $W_{pl} = 230$  MPa et  $\beta' \approx 4$ .

En reportant ces valeurs dans l'Eq. (8), nous pouvons estimer les cissions de frottement  $\tau$  relatives à chaque savon utilisé (Fig. 6).

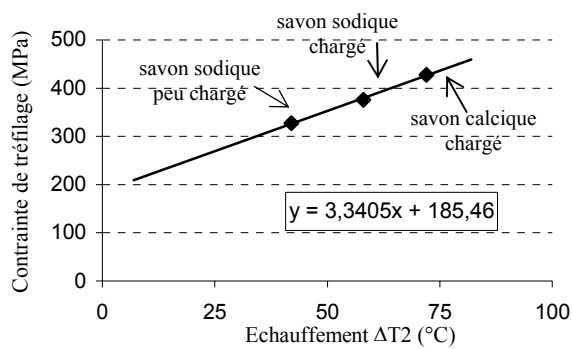


Fig. 5 : Evolution des contraintes de tréfilage en fonction des échauffements de filière mesurés à l'interface noyau/fil par le thermocouple  $T_2$  [fil  $\varnothing$  2,2 mm – filière  $\varnothing$  1,85 mm/16° - 3 savons commerciaux – 1 m/s]

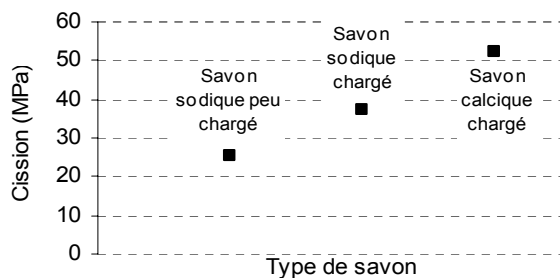


Fig. 6 : Valeurs des cissions de frottement calculées à partir des mesures de forces de tréfilage et de températures de filière au moyen du modèle thermomécanique élémentaire [fil  $\varnothing$  2,2 mm – filière  $\varnothing$  1,85 mm/16° - 3 savons commerciaux – 1 m/s]

### 3.3 Discussion

La valeur du travail de déformation plastique  $W_{pl}$  obtenue peut être comparée à celle calculée d'après la loi rhéologique établie à partir d'un essai de masse tombante, imposant, comme en tréfilage, de très grandes vitesses de déformation. En effet, l'acier utilisé répond à une loi de type  $\sigma_0 = \sigma_1(\epsilon + \epsilon_0)^n e^{-\beta T}$ , ce qui permet d'estimer  $W_{pl}$  comme égal à 230 MPa. Cette valeur est identique à celle que nous avons obtenue grâce aux essais de tréfilage et constitue ainsi une première validation de notre modèle. La valeur de  $\beta'$  obtenue indique que l'échauffement du fil serait 4 fois supérieur à celui mesuré dans la filière par le thermocouple. Ce facteur élevé n'est pas a posteriori si surprenant, compte tenu que le diamètre du thermocouple est voisin de la longueur de contact. En ce qui concerne les cissions de frottement, nous constatons qu'elles sont comprises entre 20 et 60 MPa et varient suivant la nature de la

matière grasse du savon et sa teneur en charge. Ainsi, elles augmentent si le savon est de type calcique ou bien si le pourcentage de charges est important.

### 4. Conclusions

Nous avons montré comment l'utilisation d'un modèle thermomécanique élémentaire, basé sur des mesures de forces de tréfilage et de températures de filière, permet d'identifier des paramètres propres à la rhéologie du fil et des lubrifiants. Nous avons ainsi pu établir un classement des savons de tréfilage en fonction de leur formulation. Nous avons montré que la nature de la matière grasse, ainsi que la teneur en charge du savon, ont une influence sur le niveau de frottement. A l'heure actuelle, cette méthode s'applique dans le cadre d'essais sur prototypes et nécessiterait d'être encore éprouvée dans d'autres conditions pour valider totalement le modèle et déterminer ses limites. Toutefois, outre son intérêt scientifique, elle nous semble présenter un grand intérêt industriel puisqu'elle permettrait d'avoir un contrôle du procédé en temps réel et non destructif.

### Références

- [1] Montmitonnet, P. Contribution à l'étude de la lubrification par les savons en tréfilage. Thèse de Docteur Ingénieur, Ecole des Mines de Paris, 138 p.(1983).
- [2] Baker, G., Wright, R.N. Friction coefficients in laboratory simulation of magnet wire drawing. Interwire 1991, Conference Proceedings, Wire Association International (1991).
- [3] Sachs, G. Plasticity problems in metals. *Trans. Faraday Soc.*, 24, 84-92 (1928).
- [4] Felder, E. Evaluation of the influence of redundant work and friction in wire drawing. *Annals CIRP*, 25,1 (1976).
- [5] Felder, E. Effet thermique de la mise en forme : théorie et phénomènes volumiques. *Techniques de l'Ingénieur, Traité Matériaux Métalliques*. M3012, p 1-24 (2001).
- [6] Felder, E. Effet thermique de la mise en forme : phénomènes superficiels et modélisation. *Techniques de l'Ingénieur, Traité Matériaux Métalliques*. M3013, p 1-28 (2001).