

## Sujet de thèse 2023- CEMEF

TITRE	<b>Modélisation tribologique du laminage à froid d'alliages d'aluminium</b>
Objectif général	<p>Le sujet de la thèse concerne un des aspects fondamentaux du laminage à froid, avec de nombreuses applications industrielles : la modélisation du frottement entre les outils (les cylindres de laminage) et la pièce à mettre en forme. L'objectif de la thèse est la modélisation du régime de lubrification lors du procédé de laminage à froid de tôles, en se focalisant sur l'effet de la température au niveau du contact entre la tôle et l'outil. Par exemple, la température a un impact fort sur le comportement des éléments qui constituent le lubrifiant, ainsi que sur l'endommagement des surfaces lors d'un transfert adhésif, comme montré figure 1.</p>
Contexte	<p>Le laminage à froid a plusieurs objectifs : réduire l'épaisseur, augmenter les propriétés mécaniques et développer un état de surface apte à l'application. Le laminage étant un procédé à outils moteurs (les cylindres), le coefficient de frottement ne doit donc pas descendre trop bas. Pour gérer ces contraintes, on utilise des huiles dont la viscosité est choisie pour faire travailler l'interface dans le régime mixte de lubrification. Il y a donc une composante hydrodynamique du frottement, mais aussi une composante chimique, de régime limite, au pro rata de l'aire réelle de contact (figure 2).</p> <p>Un modèle de lubrification mixte a été développé au cours d'une précédente thèse et il est couplé à un modèle de laminage [1]. Il détermine le niveau de frottement mais à travers la donnée « arbitraire » d'un coefficient de frottement représentatif des zones en contact limite. C'est une limitation majeure de la prédictivité de ce modèle et c'est l'objectif de cette thèse que de la repousser.</p>
Présentation détaillée avec si possible figure(s)	<p>L'objectif de la thèse est d'améliorer la modélisation du frottement, en faisant appel à des domaines scientifiques très divers. Ces avancées scientifiques permettront d'optimiser les paramètres du procédé du laminage à froid, pour garantir au produit des propriétés optimales, tout en limitant les efforts sur les laminoirs.</p> <p>La réalisation de cet objectif passera par un couplage fort entre un travail expérimental de mesure et de caractérisation (sur laminoir pilote au centre de R&amp;D de Constellium et sur tribomètre au laboratoire du CEMEF) et un travail de modélisation à travers le développement d'un programme informatique.</p> <p><b>Partie expérimentale : de l'importance de la température</b></p> <p>Comme le frottement limite dépend de la température, un modèle de régime limite doit comporter un calcul efficace et précis des cartes de température au voisinage de l'interface, tant du côté tôle que du côté cylindres. D'autre part, la montée de la température est un des facteurs déclenchants du phénomène de transfert adhésif [2] formant une couche épaisse et rugueuse sur les cylindres, qui entraîne à son tour une dérive majeure du frottement qui interdit des conditions</p>

stables de laminage.

La détermination expérimentale de la température en laminage se fera sur un des laminoirs de prototypage de Constellium qui permet de reproduire le comportement des laminoirs industriels à échelle réduite (figure 3). La mise au point d'un protocole expérimental (destiné à alimenter le modèle et à le valider) sera à mener. La mesure de température présente sur le laminoir, figure 4, sera un paramètre clé.

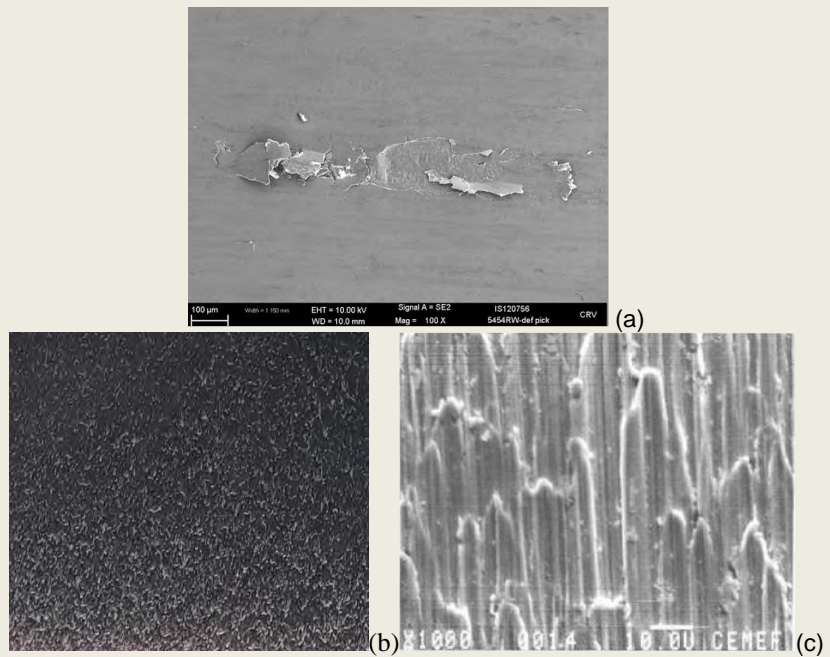
#### **Partie modélisation : vers un coefficient de frottement robuste**

Le travail ici consiste à améliorer le logiciel existant, d'un point de vue théorique et numérique. Il permet par exemple de prédire l'évolution de l'aire de contact ou du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de laminage (figure 5). La vitesse est un paramètre clé du laminage, notamment pour des raisons évidentes de productivité : être capable d'aller vite tout en garantissant les propriétés est un axe majeur d'amélioration.

#### **Le programme de travail comporte :**

- 1) La modélisation thermique couplée bande – cylindre, sachant que la déformation plastique de la bande est la source de chaleur principale, et le frottement à l'interface la source secondaire. Une attention particulière sera portée à la validation, par des mesures sur laminoir pilote.
- 2) La refonte du modèle de lubrification, de son organisation informatique, en vue d'une plus grande robustesse et efficacité.
- 3) Sur la base des résultats précédents (épaisseur de film lubrifiant), de la température de surface et d'un modèle simple d'endommagement de surface, une analyse du transfert adhésif à l'instar de [3], Cette dernière servira, à l'aide de modèles tribologiques adéquats entre surfaces rugueuses [4], à déterminer la composante « limite » du frottement dans le cas où les conditions critiques de formation de la couche de transfert sont atteintes.
- 4) L'ensemble de ces modèles et conclusions fera l'objet d'expériences de validation comportant des essais tribologiques en laboratoire, des essais sur laminoir pilote doté des mesures nécessaires, en particulier thermiques, et de l'analyse de mesures en production.

Les travaux proposés se placent donc au carrefour de la thermique du système bande-cylindre, de l'adhésion métal-métal en contact lubrifié, de la théorie de la lubrification et de la modélisation en tribologie.



- (a) arrachement local dû à un collage entre le cylindre et la tôle
- (b) résultat du labourage de la surface par la couche de transfert qui donne une surface en « peau d'orange »
- (c) zoom sur les « écailles de collage »

Figure 1 : états de surfaces liés aux phénomènes adhésifs du régime limite

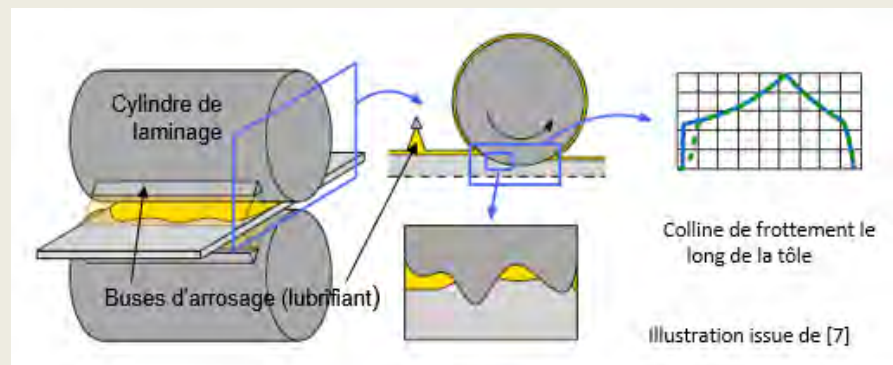


Figure 2 : illustration de la démarche multi-échelles de modélisation tribologique [5]



Figure 3 : le laminage-pilote de Constellium C-TEC (Voreppe)

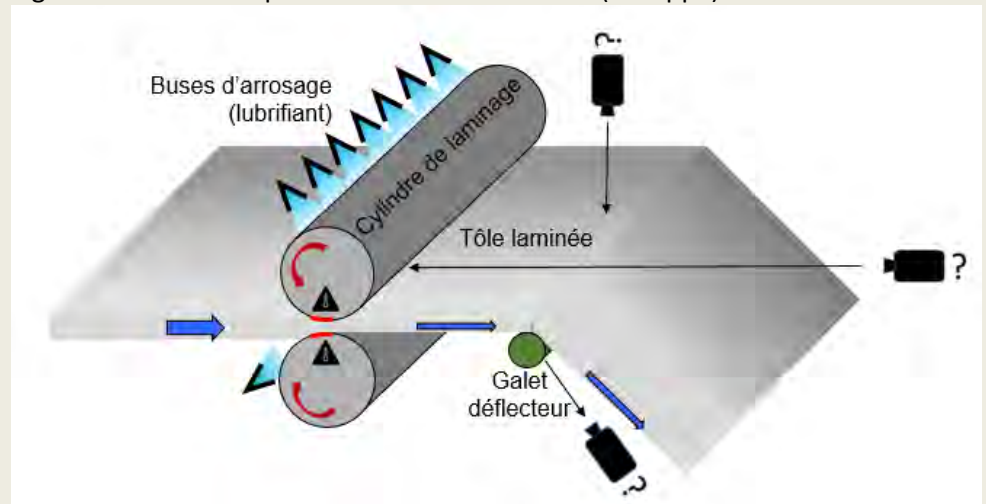
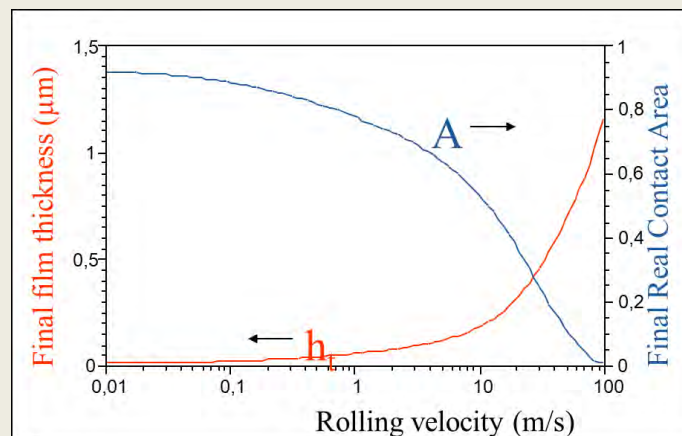


Figure 4 : vers une mesure de température fiable de la bande et du cylindre en sortie de laminage



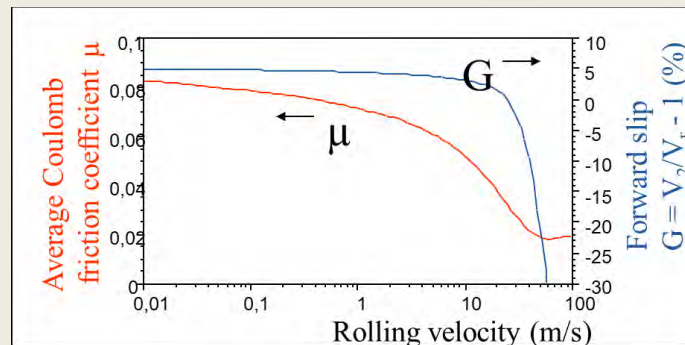


Figure 5 : exemple de résultats obtenus grâce à un modèle couplé laminage-lubrification : paramètres microscopiques (A et h), paramètres macroscopiques (courbe de Stribeck  $\mu(V)$  et glissement en avant G).

Réf. bibliographiques

- [1] N. Marsault, P. Montmitonnet, P. Deneuille, P. Gratacos: Un modèle de laminage lubrifié en régime mixte. Revue de Métallurgie - Science et Génie des Matériaux 98, 5 (Mai 2001) 423-433
- [2] P. Montmitonnet, E. Felder: Usure, transfert et conséquences. De l'observation à la modélisation. Les Techniques de l'Ingénieur, TRI 504 (2017)
- [3] O. Filali : Approche multiphysique du contact frottant en grande déformation plastique : prédiction numérique du grippage d'alliages d'aluminium en mise en forme à froid. Thèse, UPHF (2020)
- [4] W.R.D. Wilson: Friction models for metal forming in the boundary lubrication regime. J. Engg. Mat. Technol. (Trans. ASME) 113, 1 (1991) 60-68
- [5] D. Boemer: Numerical modeling of friction in lubricated cold rolling. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Ingénieur, Université de Liège, Belgique, 2020

Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant

*Rédaction d'articles*  
*Présentation dans des conférences internationales*

Outils

*Essais sur laminoir expérimental et sur laminoirs de production.*  
*Méthodes de caractérisation de surface (MEB/EDX, XPS, rugosimétrie...).*  
*Programmation (Fortran, Python).*

Mots-clé

Laminage à froid, tribologie, modélisation numérique, Transferts thermiques, adhésion, lubrifiants et additifs

Type projet/ collaboration

La thèse CIFRE s'inscrit dans le cadre d'un partenariat académique entre plusieurs entreprises du secteur de la métallurgie et les Mines de Paris. Les doctorants seront encouragés à échanger et travailler ensemble.

Profil & compétences

Mécanique, Modélisation numérique, langage python.  
Une formation en tribologie et/ou thermique serait appréciée, ainsi que la motivation tant pour le numérique que pour l'expérience.

	Rigueur et capacité à s'investir pleinement dans un sujet. Aptitude au travail en équipe. Maîtrise de la langue anglaise (niveau B2 minimum).
Lieux	- MINES Paris, CEMEF, Sophia Antipolis (80%) - Constellium C-TEC, Voreppe (20%)
Equipe(s) de recherche	Procédés, Surfaces, Fonctionnalités (PSF)
Encadrant / Dir. de thèse	Pierre Montmitonnet, Directeur de Recherches CNRS (HDR) <a href="mailto:pierre.montmitonnet@minesparis.psl.eu">pierre.montmitonnet@minesparis.psl.eu</a> Imène Lahouij, Chargée de Recherches Ecole des Mines de Paris Frédéric Georgi, Ingénieur de Recherches CNRS Correspondant Constellium C-TEC : Alexandre Barthelemy <a href="mailto:alexandre.barthelemy@constellium.com">alexandre.barthelemy@constellium.com</a>

**Pour postuler :** Le dépôt de votre candidature se fait en ligne uniquement en remplissant le formulaire CEMEF en ligne sur :  
<https://applyfor.cemef.mines-paristech.fr/internship/>