

Compréhension et modélisation du régime mixte : synthèse des avancées et perspectives d'applications industrielles

P. Montmitonnet*, P. Deneuille**, P. Gratacos***, G. Hauret***, M. Laugier***

* Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF),
École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis
** Pechiney - Centre de Recherches de Voreppe
*** Irsid - Groupe Usinor, Maizières-les-Metz

L'ensemble des travaux décrits précédemment, et résumés ici, a d'ores et déjà fait l'objet de mises en application diverses, qui sont décrites dans cette courte conclusion : explications d'observations sur sites de production, modèles de connaissance, nouvelles idées de formulation de lubrifiants, qui ne demandent qu'à être testées. Bien sûr, l'ensemble des besoins de connaissances et de nouveaux outils n'a pas été satisfait, et quelques pistes de travaux futurs sont dégagées.

■ RÉSUMÉ DES ACQUIS

Le besoin essentiel de l'industrie est de disposer d'un modèle de frottement (à coupler aux modèles de procédés, ici de laminage), qui soit prédictif parce que fondé sur une analyse des phénomènes tribologiques fondamentaux. À l'aide d'un tel modèle incluant autant de paramètres du procédé que possible, on souhaite pouvoir résoudre des problèmes industriels existants, mais aussi concevoir les gammes de laminage de nouveaux produits et, pourquoi pas, intervenir dans la conception des trains de laminoirs eux-mêmes.

Ce modèle de frottement a pour vocation de regrouper l'ensemble des connaissances, pré-existantes comme acquises lors de ces travaux. Mais ces connaissances peuvent aussi servir, indépendamment du modèle, à améliorer tel aspect particulier des procédés de laminage, par exemple participer à la formulation des lubrifiants, dans un dialogue constructif avec les fournisseurs.

Sur tous les plans, notre vision du contact et de l'emprise a été transformée et enrichie par tous ces travaux. D'abord, pour l'aluminium, nous nous sommes rendus compte que la mince couche d'oxyde (quelques nanomètres) ne se contentait pas de se fissurer, comme dans un essai de traction, mais était pulvérisée, ses fragments se retrouvant sur le cylindre (couche de transfert mince), dans le lubrifiant bien sûr, mais aussi enchâssés dans le métal sous-jacent de la tôle, le reste participant sans doute à la croissance de la nouvelle couche, entre deux cages de laminoir. De plus, en conditions de laminage sévères, une couche superficielle du métal recristallise ; elle serait d'autant plus épaisse que la réduction et la vitesse sont grandes. La transformation de la surface est donc totale ; le lubrifiant sera au contact d'oxydes avant le contact, mais de métal nu dans l'emprise. Comparativement, les oxydes de fer couvrant la tôle d'acier, un peu plus ductiles, protègent un peu mieux sa surface – si l'oxyde se transforme considérablement après laminage, le métal sous-jacent est simplement écrasé (article de Plassart et al.*).

Les mécanismes de réaction des additifs sont différents selon qu'ils trouvent un oxyde ou du métal : c'est surtout vrai de l'aluminium, moins de l'acier. On a retrouvé les adsorptions classiques des additifs polaires, avec des réactions formant des savons d'aluminium (sur le métal nu) ou de fer (que le métal soit nu ou oxydé). Les alcools se transforment en aldéhydes et acides, et ils hydroxydent les surfaces oxydées. Les additifs extrême-pression (EP) forment bien que leur FeS, que leurs phosphates. Mais on trouve les produits de réaction en beaucoup plus grande quantité dans les contacts longs et répétés du LTDS (tribomètre sous ultravide, article de Boehm et al.) que dans les contacts uniques

(*) Cet article ainsi que d'autres cités ici ont été publiés dans le numéro de février de cette même revue, en première partie du thème. Voir page X la liste de l'ensemble des articles du thème publiés par la RM ainsi que leur répartition entre les deux numéros.

Understanding and modelling the mixed lubrication regime : summary of achievements and perspectives of industrial applications

P. Montmitonnet*, P. Deneuve**, P. Gratacos***, G. Hauret***, M. Laugier***

* Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF),
École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis
** Pechiney - Centre de Recherches de Voreppe
*** Irsid - Groupe Usinor, Maizières-les-Metz

The purpose of modelling is generally to be predictive, and these works on friction and lubrication in cold strip rolling were no exception. Predictivity is e.g. necessary when trying to design new schedules for new products, or even when designing new rolling mills. To this end, a tribological model needs be founded on a careful analysis of fundamental tribological phenomena.

Our vision of cold rolling tribology was deeply transformed and renewed by the works presented() issue, starting from the behaviours of superficial metal and oxide layers : brittle alumina undergoes a complete transformation upon cold rolling, together with the underlying metal which may recrystallize, more or less deeply depending on rolling conditions. More ductile iron oxides offer a better protection of the metal.*

Polar additives form aluminium soaps on naked metal surface only ; on iron, on both oxide and naked metal. Alcohols are oxidized into aldehydes and acids and hydroxylate the oxide surfaces. Sulfur EP additives form FeS on iron, phosphate esters form organo-metallic phosphates. Reaction products are found much more abundant after durable contact (UHV Tribometer, LTDS) than after single, short contacts (rolled strip, CEMEF) : their action should be more through reaction with rolls than with strips. Among the new tools and methods, ToF-SIMS and gas phase lubrication in the Ultra-High Vacuum Tribometer have proven quite fruitful.

The mechanisms by which polar additives start to concentrate near surfaces before reacting with them have been studied. Even the base oil may undergo demixtion at surfaces if composed of molecules of different polarities. Furthermore, these adsorbed layers promote sliding of the lubricant film, depending on their arrangement ("chemical roughness"), with consequences on film formation and load bearing capacity.

By the way, the conditions of load bearing capacity creation have been studied, in particular its decrease due to micro-cavitation in divergent areas, strongly depending on roughness and its orientation. Continuously decreasing gaps are therefore a must for the high load bearing capacities necessary in metal forming.

(*) In the previous (February 2001) and the present issues.

A model of the mixed lubrication regime describes the evolution of tribological internal variables and friction. Coupled with a rolling process model, it allows the investigation of the effect of a large number of process or material parameters, to draw e.g. sets of Stribeck curves.

A few applications have already been effected to understand or correct practical problems. Thus, the strip tension - forward slip characteristics can be studied (fig. 1) ; it is suggested to have some impact on mill vibrations ("chatter"), a most detrimental phenomenon. The model also shows an increase of friction coefficient when the roll diameter is decreased, which hinders the positive effects expected from such a change (smaller rolling force and torque). It allows to discriminate, among the many factors influencing friction in thin foil rolling, those with a major impact, which may most profitably be used as actuators (speed, oil viscosity, strip and roll roughness). Potential applications to lubricant formulations are also evoked ; roughness morphology control may be another way of better controlling friction.

Certainly, predictivity of the model is jeopardised by the poor knowledge on the boundary friction (on «plateaux»). If the nature of these boundary films is better and better known, their tribological properties are hardly understood, even in studies carried out in very academic situations like in the Surface Force Apparatus (SFA) or Friction Force Microscopes (FFM). They include the viscosity of thick glassy films formed by extreme pressure additives (EP); or the molecular-scale friction of grafted or self-assembled films of polar molecules. Thus by now, a friction coefficient has to be chosen arbitrarily for these boundary areas. No doubt that the rapid progress of nano-techniques based research will allow application to our complex industrial systems.

The final challenge is to apply the developed tools and techniques to emulsion lubrication, which introduces two new components, emulsifiers and water, and their interactions with metal or oxide surfaces. Such phenomena as "plate out" (demixtion of oil from water forming a fat film on the surfaces) or "dynamical concentration" (preferential entrainment in the bite of oil droplets as compared to less viscous water) then become dominant. Models of these mechanisms exist and could be operated with profit in a strip rolling context.

et courts du CEMEF (laminage, Dauchot et al.) : ils agiraient plus sur les cylindres que sur la tôle elle-même, par manque de temps. Sur le plan des méthodes, le ToF-SIMS (Time-of-Flight - Secondary Ion Mass Spectrometry), après une mise au point difficile des procédures, se révèle être un outil performant pour étudier ces problèmes de chimie complexe. Quant à la lubrification en phase gazeuse, elle se montre remarquablement représentative de la lubrification liquide, tout en éliminant les phénomènes hydrodynamiques pour ne garder que la tribochimie à l'état pur.

Pour former des couches dans les temps extrêmement courts qui leur sont laissés, les additifs commencent par se concentrer vers les surfaces sous l'attraction des forces moléculaires, lorsque les entrefers ont quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur : ainsi, la comparaison aux modèles élasto-hydrodynamiques de la mesure d'épaisseur par interférométrie permet de déceler la démixtion d'une huile contenant paraffines, naphènes et aromatiques, alors qu'une huile purement paraffinique ne montre pas de démixtion (article de Molimard et al.). De même, l'adsorption des additifs polaires se traduit par la formation d'une épaisseur minimale, une couche « solide ».

Sur ces couches d'additifs polaires, le laboratoire PMC a montré que les alcanes glissaient (article de Pit et al.) : il n'y a pas continuité de la vitesse, et cet effet sera d'autant plus important que l'entrefers sera fin. Le taux de glissement dépend fondamentalement de l'organisation de la couche d'additifs limites (sa « rugosité chimique »), et l'impact d'une vitesse de glissement sur la formation du film lubrifiant n'est pas anecdotique, comme l'a montré le calcul (article de Letalleur, Bayada et Meurisse).

Justement, ces calculs sur des rugosités modèles mettent en exergue le rôle des entrefers localement divergents, qui conduisent à des microcavitations qui font chuter la portance (donc, à pression imposée, font décroître les épaisseurs de film). On ne peut engendrer les fortes pressions nécessaires au maintien d'un film continu que si les entrefers décroissent continûment de l'entrée à la sortie de l'emprise, ou, grâce à la compressibilité non nulle du lubrifiant, si la géométrie des aspérités a une forte composante transverse.

Tous ces résultats viendront enrichir un modèle tribologique de régime mixte qui :

- décrit l'évolution, sous l'effet de la pression de laminage, des variables internes microscopiques et locales que sont l'épaisseur moyenne de film lubrifiant (supposée nulle sur les plateaux, où l'on doit donner un coefficient de frottement : deux points criticables de cette physique) et l'aire réelle de contact, ou « taux de plateaux » ;
- en déduit la contrainte locale de frottement, qui est réinjectée dans le modèle de laminage, qui reboucle itérativement ;
- permet d'étudier l'effet de la vitesse sur le frottement, du régime limite à la lisière du régime hydrodynamique (courbe de Stribeck).

■ LES APPLICATIONS : RÉALITÉ PRÉSENTE ET PROMESSES FUTURES

Broutage, tension de bande et glissement en laminage de tôles d'acier

Le « broutage », un des comportements les plus pénalisants des laminoirs, est une vibration verticale des cylindres se traduisant par des variations sinusoïdales d'épaisseur de la tôle. D'une fréquence de l'ordre de 200 Hz sur les laminoirs usuels, il implique l'amorçage d'une vibration par une perturbation extérieure et son auto-entretien par l'existence d'une relation de quadrature de phase entre la vibration des cylindres et les fluctuations de tension de bande qui en résultent. En pratique, l'apparition du broutage exige impérativement de diminuer la vitesse de laminage.

Si les origines et les conditions propices à l'auto-entretien sont mal cernées (elles dépendent certainement des laminoirs et des produits laminés), on soupçonne dans un certain nombre de cas l'effet d'une sur-lubrification et l'intervention du patinage (glissement en avant négatif dû à un frottement insuffisant pour entraîner la tôle). Sans résoudre le problème du broutage, le modèle de frottement couplé au modèle de laminage a permis de retrouver les variations expérimentales de la relation tension de bande - glissement en avant (*fig. 1*), qui peut être très raide et à pente très discontinue au voisinage de la limite de patinage. On pense qu'une telle caractéristique est sinon une cause déclenchante, du moins un facteur de risque du broutage.

Diamètre des cylindres et frottement en laminage d'Acier Pour Emballage (APE)

Plus une tôle est fine, plus l'impact de variations du frottement est fort. Supposons que l'on souhaite maintenir la force et le couple de laminage dans les limites de la capacité d'un laminoir, en dépit de produits plus durs, de réductions plus fortes ... Une solution consiste à diminuer le diamètre des cylindres de travail : tout modèle de laminage digne de ce nom montrera que force, couple et glissement en avant décroîtront alors – à *coefficient de frottement constant*. Pourtant, en pratique, on n'obtient pas forcément le gain escompté. Pourquoi ? C'est là qu'un modèle tribologique montre son efficacité : le fait de diminuer le diamètre des cylindres abaisse la quantité de lubrifiant entraînée et fait donc augmenter le frottement, effet négatif qui, compte tenu de la sensibilité rappelée plus haut, annule l'effet positif. Un simple coup d'œil à la formule de Wilson et Walowit (équation [5] du texte de Montmitonnet, Marsault, Deneuille et Gratacos dans ce numéro) permet d'ailleurs de comprendre qualitativement que diminuer le diamètre des cylindres, c'est augmenter l'angle d'attaque, donc diminuer l'épaisseur de film lubrifiant. Cette conclusion d'un modèle purement hydrodynamique reste qualitativement vraie en régime mixte et explique la déconvenue.

Figure 1 – Relation entre tension amont et glissement en avant.

Glissement en avant expérimental : tiré de (1) ;
acier au carbone, épaisseur 0,8 mm, largeur 250 mm.
Cylindres de travail \varnothing 161,4 mm \times 400 mm, $R_a = 0,20 \mu\text{m}$;
cylindres d'appui \varnothing 480 mm \times 400 mm. Réduction : 20 %,
vitesse $0,16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tension aval 98 MPa.
Lubrifiant : émulsion, concentration : 6 %.

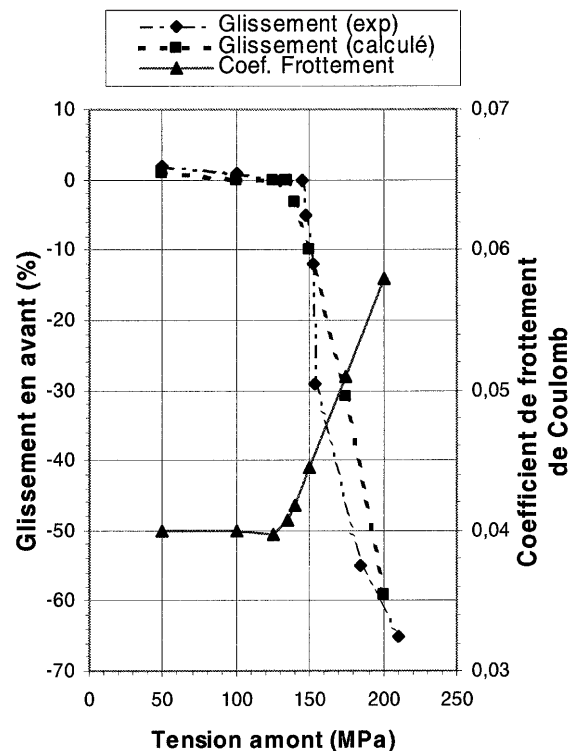
Glissement calculé et coefficient de frottement
de Coulomb moyen : calculé (à l'Irsid) par le modèle décrit
dans l'article de Montmitonnet, Marsault, Deneuille et
Gratacos dans ce numéro, à l'aide des données ci-dessus.

Figure 1 – Relation between back tension and forward slip.

Experimental forward slip : from (1) ; plain carbon steel,
thickness 0.8 mm, width 250 mm.

Work rolls \varnothing 161,4 mm \times 400 mm, $R_a = 0,20 \mu\text{m}$;
back-up rolls \varnothing 480 mm \times 400 mm. Reduction : 20 %,
speed $0.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, front tension 98 MPa.
Lubricant : emulsion, concentration 6 %.

Computed forward slip and average Coulomb friction coefficient :
computed (at Irsid) using the model described
in the paper by Montmitonnet, Marsault, Deneuille and
Gratacos in this issue, using data shown above.



Étude paramétrique du frottement en laminage de feuille mince en aluminium

Ces produits, les plus minces, sont aussi ceux pour lesquels le frottement joue le rôle le plus important, en se conjuguant à de très grandes déformations des cylindres de travail. Ainsi, le frottement, par l'intermédiaire de la vitesse et de son action hydrodynamique, est un des actionneurs de la réduction. Il est donc particulièrement important de connaître les facteurs qui vont le plus conditionner le frottement, d'où un « plan d'expérience numérique » qui a permis de quantifier l'influence du doublet (vitesse, viscosité de l'huile), mais aussi de mettre en évidence l'importance de la rugosité de la feuille et des cylindres sur le processus de lubrification. Une telle étude permet de définir les actionneurs les plus efficaces en vue d'une automatisation des laminoirs.

Formulation des lubrifiants

L'ensemble des résultats collectés sur les mécanismes d'action des additifs permet de concevoir des essais de nouvelles formulations :

- incluant des extrême-pression jusque-là inusités dans les lubrifiants pour l'aluminium ;
- reposant sur une relation établie entre structure et propriétés tribologiques d'un additif au sein d'une famille donnée (esters).

De tels efforts de formulation doivent être dirigés non seulement vers la bande, mais peut être davantage vers les

cylindres, qui sont les éléments pérennes du contact, ceux sur lesquels les couches réactionnelles ont le temps de se former. Un des enjeux serait ainsi d'accélérer l'atteinte des performances optimales après un changement de cylindres ; cette évolution passe certainement par un rodage mécanique (abrasion des crêtes les plus aiguës résultant de la rectification des cylindres) mais aussi par la formation de couches tribochimiques favorables, dont nos travaux laissent entrevoir la cinétique.

Préparations de surface

Dans le même ordre d'idées, puisque les rugosités de la tôle comme du cylindre sont des facteurs importants du frottement, on doit se poser la question de la rugosité optimale et de la façon de l'obtenir. C'est d'ailleurs un problème à la fois très ancien et très actuel dans tous les procédés de laminage (« skin pass ») qui tendent à imprimer sur la tôle une certaine morphologie de rugosité à partir de celle des cylindres. Mais on doit maintenant aussi réfléchir à la rugosité qui offrira la meilleure lubrification, les meilleures capacités de circulation du lubrifiant, de re-lubrification des plateaux à partir des vallées (quel spectre de longueurs d'ondes rechercher ?).

■ POUR ALLER PLUS LOIN

Il est certain que, sur la voie de la prédictivité, la pierre d'achoppement essentielle reste la composante « limite » du contact. Si la nature des films interfaciaux commence à être mieux connue (et les travaux ici décrits y ont apporté leur

contribution), un gros effort reste à faire pour connaître leurs propriétés tribologiques : ce sont encore des propriétés d'écoulement, liées à leur viscosité, pour des films épais tels que des « verres » de phosphates ; plutôt des propriétés physico-chimiques pour les films plus minces formés à partir d'additifs polaires, propriétés que l'on peut mesurer sur des couches greffées ou auto-assemblées dans des machines à forces de surface (SFA) ou des microscopes à force latérale ou à force de frottement (LFM ou FFM). Ils constituent le « frottement sur les plateaux » que les modèles mixtes sont actuellement obligés de choisir arbitrairement. Ces nano-techniques avancent à grand pas, et il semble maintenant envisageable de les appliquer à nos systèmes.

Un autre défi consiste à passer aux émulsions, une vaste et très importante catégorie de lubrifiants de mise en forme des métaux. Sur le plan chimique, aux huiles et additifs que nous avons étudiés, elles rajoutent les tensio-actifs émulsifiants ainsi que l'eau, et leurs interactions avec les surfaces métalliques oxydées, dont résultent le très important phénomène dit « plate out », démixtion d'un film d'huile qui se dépose sur les surfaces solides. Sur le plan mécanique, ces fluides diphasiques – voire triphasiques en cas de cavitation – présentent en entrée de contact des mécanismes dits de « concentration dynamique », c'est-à-dire que la phase la plus visqueuse est préférentiellement entraînée : dans des conditions favorables, c'est un film d'huile presque pure qui lubrifie le contact, alors même que l'on utilise une émulsion de quelques pour cent d'huile dans l'eau. Des modèles existent, qu'il reste à mettre en œuvre.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier pour son soutien scientifique autant que financier le CPR « Mise en Forme des Matériaux - Contact outil-métal-lubrifiant », Contrat de Programme de Recherche entre le CNRS (SCA), l'Irsid, Pechiney Recherche, l'Université de Paris-Sud Orsay (LMS), le Collège de France (PMC), l'École Centrale de Lyon (LTDS), l'Institut National Polytechnique de Toulouse (IMF), l'INSA de Lyon (LMC), l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris (CEMEF).

bibliographie

- (1) SHIRAIISHI (T.), YAMAMOTO (H.), HASHIMOTO (J.), NIITOME (T.) – Characteristics of cold rolling in consideration of negative forward slip ratio. **J. of the Japan Society for Technology of Plasticity**, 36, 412 (1995), p. 457-462.