



HAL
open science

Thermique des contacts glissants en présence de 3ème corps solide

David Richard, Ivan Iordanoff, Mathieu Renouf, Yves Berthier

► **To cite this version:**

David Richard, Ivan Iordanoff, Mathieu Renouf, Yves Berthier. Thermique des contacts glissants en présence de 3ème corps solide. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03361661

HAL Id: hal-03361661

<https://hal.science/hal-03361661v1>

Submitted on 1 Oct 2021

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.

Thermique des contacts glissants en présence de troisième corps solide

David Richard*, Ivan Iordanoff**, Mathieu Renouf* & Yves Berthier*

* INSA de Lyon

Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures, CNRS UMR5259
Bâtiment Jean d'Alembert, 18-20 Rue des Sciences, F69621 VILLEURBANNE Cedex
david.richard@insa-lyon.fr

** LAMEFIP - Equipe d'Accueil 2727 ENSAM Université Bordeaux 1 33405 Talence

Résumé :

La plupart des modèles couplant traitement mécanique et thermique au sein d'un contact se place à une échelle globale, utilisant les outils de la mécanique des milieux continus. Ainsi, à cette échelle, la complexité des phénomènes physiques locaux et du contact lui-même n'est pas pris en compte. Par exemple, le troisième corps, volume intermédiaire évoluant entre les surfaces dites "en contact", dont le rôle est la prévention de l'usure, ainsi que les échanges thermiques locaux ne sont pas considérés. L'étude numérique ici présentée se place à l'échelle de ce troisième corps et met en relation ses propriétés cohésives et thermiques avec l'accommodation des vitesses et les conséquences thermiques dans l'épaisseur totale du contact. Pour cela, un modèle par éléments discrets est utilisé, enrichi d'un traitement thermique reliant diffusion locale et force de contact. Grâce à ce modèle, régimes d'écoulement, approche énergétique du frottement, profils de dissipation de puissances et cartes thermiques peuvent être mis en évidence.

Abstract :

The current models dealing with the thermal aspects of the dry contacts have a very global approach that does not allow the tribologist to fully understand the phenomena at stake during friction. The third body, an intermediate volume between surfaces "in contact" is not taken into account although its role in both thermal and wear processes has been shown. This paper deals with the influence of the cohesive and thermal properties of the third body on speed accommodation and thermal consequences in the contact thickness. A DEM model has been developed and simple mechanical contact laws at the origin of the thermal processes have been set up to put forward the different shearing profiles, the energetic approach of friction and the dissipated power - thermal profiles in the contact.

Mots-clefs :

Troisième corps ; Frottement ; Thermique

1 Introduction

Depuis déjà plusieurs décennies les modèles traitant de la thermique des contacts secs se basent sur la théorie de Blok (Blok (1937), Jaeger (1942), Komanduri (2001)). Si, au travers de l'utilisation de coefficients de partage empiriques, de bonnes approximations sont faites quant à l'estimation des températures de surfaces des corps en contact, de fortes hypothèses simplificatrices limitent la compréhension des phénomènes réellement mis en jeu au sein de l'interface. L'ensemble de ces travaux, basé sur une approche globale (mécanique des milieux continus), ne considère pas les aspects hétérogènes et discontinus de l'interface baptisée *troisième corps* (Godet (1984)). Ce volume de matière intermédiaire, issu principalement de la dégradation des premiers corps, permet l'accommodation des vitesses dans le contact tout en transmettant les efforts entre les différents mécanismes (Berthier (1995)). Le confinement des contacts mécaniques ne permettant pas une instrumentation *in situ* efficace, une instrumentation

numérique devient indispensable pour comprendre les phénomènes locaux. Dans cette optique, Jordanoff *et al.* (2002) sont les premiers à utiliser les méthodes par éléments discrets (DEM) pour modéliser le caractère discontinu de l'interface dans le but de comprendre la rhéologie du troisième corps. Avec la même approche, Fillot (2004) met en avant le rôle du troisième corps dans la prévention de l'usure d'un point de vue expérimental et numérique. Mais même si un grand pas dans la compréhension du rôle mécanique de l'interface a été effectué, son implication thermique reste encore à être déterminée puisque le cisaillement s'effectue majoritairement à cette échelle (Ryhming (1979), Kennedy (1984)). L'objectif de cette contribution est d'initier ce second pas en utilisant un modèle discret couplant mécanique et thermique pour l'étude de la rhéologie du troisième corps. Ainsi, après une rapide présentation du modèle, une approche énergétique et thermique est mise en avant.

2 Approche numérique

2.1 Stratégie de résolution

La méthode utilisée dans la suite de cette étude, est celle présentée dans les travaux de Jordanoff *et al.* (2002); Fillot (2004). Elle s'appuie sur une intégration temporelle explicite (schéma de Verlet en vitesse) et sur une description explicite du contact. Les échelles de temps considérées sont suffisamment petites pour pouvoir traiter les contacts de façon indépendante. La loi de contact utilisée est une loi cohésive à trois paramètres, essayant de traduire de façon simple la physique des interactions à l'intérieur du troisième corps. Elle se base sur l'équation suivante :

$$F = -K \cdot \delta + \alpha_{eq} \cdot \dot{\delta} - \gamma, \quad (1)$$

où K est la raideur de contact, δ l'interpénétration entre corps, α_{eq} un terme de dissipation, $\dot{\delta}$ la vitesse relative normale et γ l'adhésion. A cette loi mécanique, une description locale des échanges thermiques est ajoutée, basée sur les travaux de Vargas *et al.* (2002) en supposant que la puissance dissipée mécaniquement se transforme intégralement en puissance thermique. L'élévation de température instantanée dT_i du corps i s'écrit alors :

$$dT_i = \frac{Q_i \cdot dt}{\rho_i \cdot c_{pi} \cdot V_i}, \quad (2)$$

où Q_i représente le flux de chaleur dû à la dissipation mécanique des contacts pour le corps i et $\rho_i \cdot c_{pi} \cdot V_i$ sa capacité thermique.

Le processus de diffusion entre corps en contact, indexés i et j , se traduit par :

$$T_i^+ = T_i^- + \frac{2 \cdot \alpha_i}{V_i} \cdot dt \cdot \sum_{j-\text{contacts}} a_{ij} \cdot (T_j^- - T_i^-), \quad (3)$$

où T^- et T^+ désignent respectivement les températures à l'instant t et $t + dt$, α_i la diffusivité thermique, V_i le volume du corps i et a_{ij} le rayon effectif de l'aire de contact.

2.2 Échantillon numérique

Le domaine utilisé est celui représenté sur la figure 1. La taille et la forme des particules au sein de l'interface n'étant pas connues, l'approche discrète permet de représenter le troisième corps comme un ensemble de sphères reliées par des lois de contact cohésif. Les simulations se font à pression et vitesse données constantes en fonction du temps. L'étude est faite après une stabilisation entre les débits d'éjection et de recirculation. Les problèmes transitoires de

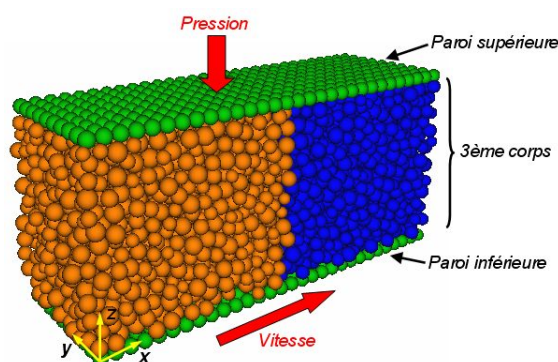


FIG. 1 – Description du contact sec stabilisé avec troisième corps par un modèle éléments discrets.

dégradations des premiers corps en contact (Fillot *et al.* (2007), Dragon-Louiset (2001)) ne sont pas traités ici. Ainsi, dans ces conditions, le contact peut se définir en trois parties :

1. Les premiers corps (parois supérieure et inférieure) parallèles sont constitués de sphères et sont supposés indéformables.
2. Le troisième corps est modélisé par un ensemble de sphères rigides.
3. Les conditions limites traduisent de façon simple les sollicitations globales : pression P et vitesse V imposées conformes à la figure 1.

L'épaisseur du troisième corps (quelques dizaines de μm) est négligeable comparée aux dimensions du contact (plusieurs mm), des frontières périodiques ont donc été mises en place dans les directions x et y de manière à traduire un contact semi-infini. Pour les conditions limites thermiques, un flux de chaleur constant en fonction du temps est évacué via les parois des premiers corps.

3 Régimes d'écoulement

En travaillant à pression P et vitesse V imposées, la variation du paramètre d'adhésion γ a permis de mettre en avant quatre régimes d'écoulement possibles pour le troisième corps :

- **régime fluide** (adhésion faible) : le profil d'accommodation des vitesses est de type Couette sur toute l'épaisseur du troisième corps (Fig. 3.a) ;
- **régime semi-fluide** (adhésion moyenne) : une région "plastique" apparaît proche de la paroi fixe (FIG. 3.b) ;
- **régime élasto-plastique** (adhésion forte) : le cisaillement s'effectue sur une faible partie de l'épaisseur du troisième corps (Fig. 3.c) ;
- **régime élastique** (très forte adhésion) : l'accommodation des vitesses se fait exclusivement à l'interface avec la paroi en mouvement sans cisaillement (ou très peu) de troisième corps (Fig. 3.d).

Ces résultats présentent des similitudes avec une partie des travaux expérimentaux de Sawyer *et al.* (2001) concernant les régimes d'écoulement en fonction de l'adhésion effectués en cellules de cisaillement sur un milieu granulaire. Ceci permet de valider le comportement mécanique du modèle avant de faire une étude énergétique et thermique.

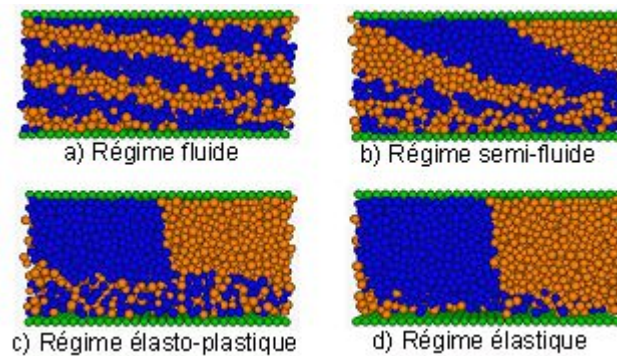


FIG. 2 – Les quatre régimes d'écoulement du troisième corps en fonction de la variation de l'adhésion entre sphères.

4 Frottement macroscopique & Puissance dissipée dans le troisième corps

La validation énergétique du modèle passe par la vérification du théorème de l'énergie cinétique appliqué au milieu discret :

$$\frac{dE_c}{dt} = P_{sup} + P_{inf} + P_{tc}, \quad (4)$$

où E_c correspond à l'énergie cinétique totale du milieu, P_{sup} et P_{inf} les puissances mises en jeu respectivement par les parois supérieure et inférieure, et P_{tc} la puissance du 3^{ème} corps. En régime stabilisé, les relations $P_{inf} = -P_{tc}$ et $P_{tc} = -F_{xinf} \cdot V$ permettent de simplifier l'équation 4 où F_{xinf} représente la projection de la résultante des efforts de contact de la paroi inférieure sur l'axe des x . Or F_{xinf} pouvant être assimilée à $\mu_{macro} \cdot F_N$, il en résulte :

$$\mu_{macro} = \frac{P_{tc}}{F_N \cdot V} = C_{ste} \cdot P_{tc}. \quad (5)$$

Cette étude apporte une nouvelle approche à la notion de coefficient de frottement. Là où les modèles "classiques" l'intègrent de manière globale via le paramètre μ_{macro} , les travaux actuels étudient les phénomènes de dissipation de puissances mécanique à l'échelle locale du troisième corps en fonction, notamment, de ses différents régimes d'écoulement à l'origine de la puissance thermique générée.

5 Traitement thermique de l'interface

La mise en jeu à la fois des aspects thermique et mécanique nécessite de déterminer l'influence du rapport $R_{d/c}$, correspondant au rapport du temps de diffusion sur le temps de contact entre sphères, sur l'évolution des températures de surface des premiers corps (Fig. 3). Le temps de contact correspond globalement au temps de libre parcours d'une sphère i.e. le temps de parcours de son propre rayon ($\approx R/V$). Le temps de diffusion correspond quant à lui au temps qu'il faut pour que deux particules en contact atteignent l'équilibre thermique lorsqu'initialement $1^\circ K$ les sépare ($\approx 10R^2/\alpha_{diff}$).

Lorsque $R_{d/c} = 1$ (troisième corps très diffusif), l'élévation de température du contact est nulle : la chaleur générée par le cisaillement est évacuée de façon instantanée. Lorsque $R_{d/c} \simeq 1000$ (troisième corps très isolant), la température du contact ne cesse de croître et selon le régime d'écoulement, de fortes dissymétries de température de surface peuvent apparaître entre

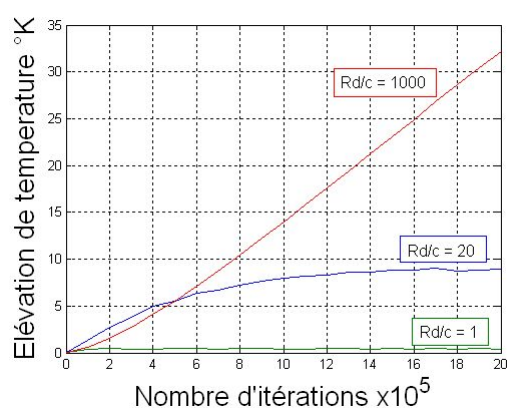


FIG. 3 – Évolution de la température de la paroi inférieure en fonction du temps (en nombre d'itérations) pour différents ratios $R_{d/c}$.

les premiers corps. Lorsque $R_{d/c}$ varie entre 10 et 100, les températures de contact tendent à se stabiliser au cours du temps.

Il reste à voir maintenant et à comprendre les conséquences sur les profils de puissance dissipée et de température dans l'épaisseur du troisième corps en fonction du régime d'écoulement. Dans le cas d'un régime élasto-plastique, où l'accommodation des vitesses se fait dans un volume restreint de troisième corps, une importante dissymétrie des sources de chaleur apparaît et qui, dans le cas d'un troisième corps isolant thermique (Majcherczak (2007)), peut entraîner de fortes dissymétries thermiques entre les premiers corps. Dans le cas d'un régime fluide pour lequel les sources de chaleur sont uniformes dans l'épaisseur du volume cisailé, la symétrie thermique dans le contact est conservée (Fig. 4).

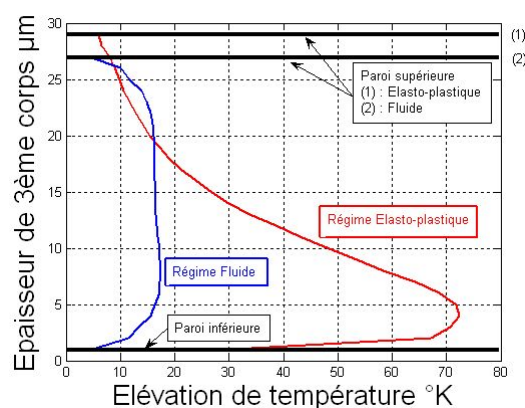


FIG. 4 – Élévation de température dans l'épaisseur de troisième corps pour les régimes fluide et élasto-plastique dans un cas extrême où $R_{d/c} = 1000$.

Ainsi à défaut de vérifier l'égalité thermique des corps en contact comme c'est le cas dans les modèles de type Blok, cette étude et les résultats qui en découlent ont une philosophie proche du modèle développé par Rhyming (Rhyming (1979)) proposant une continuité thermique à l'interface entre les premiers corps et le troisième corps.

6 Conclusions

Au travers d'une modélisation par éléments discrets de l'écoulement du troisième corps dans les contacts frottants secs, ce papier a mis en avant l'influence de l'adhésion entre sphères sur les profils d'accommodation des vitesses tout en décrivant le frottement en termes de puissance dissipée mécaniquement par ce volume intermédiaire. L'implémentation thermique a montré l'influence des propriétés diffusives sur l'évolution des températures de surfaces et enfin l'étude dans l'épaisseur du contact a mis en avant les fortes différences thermiques en fonction des propriétés cette fois-ci mécaniques (adhésion) du troisième corps.

Références

- Berthier, Y 1995 Maurice Godet's third body. *22nd Leeds-Lyon symposium on tribology, Elsevier tribology series* **31** 3-19
- Blok, H 1937 Theoretical study of temperature rise at surface at actual contact under oilness lubricating conditions. *I. Mech. E.* 222-235
- Dragon-Louiset, M 2001 On a predictive macroscopic contact-sliding wear model based on micromechanical considerations. *Int. Journal of Solids and Structures* **38** 1625-1639
- Fillot, N, Iordanoff, I, Berthier, Y 2004 A granular dynamic model for the degradation of material. *J. Tribology* **126** 606-614
- Fillot, N, Iordanoff, I, Berthier, Y 2007 Modelling third body flows with a discrete element method - a tool for understanding wear with adhesive particles. *Tribology International* **40** 973-981
- Godet, M 1990 The third body approach : a mechanical view of wear. *Wear* **100** 437-452
- Iordanoff, I, Berthier, Y, Descartes, S 2002 A review of recent approaches for modelling third bodies. *J. Tribology* **124** 725-735
- Iordanoff, I, Fillot, N, Berthier, Y 2005 Numerical study of a thin layer of cohesive particles under plane shearing. *Powder Technology* **159** 46-54
- Jaeger, J.C 1942 Moving sources of heat and temperature of sliding contacts. *Proc. Roy. Soc.* **76** 203-224
- Kennedy, F.E 1984 Thermal and thermomechanical effects of dry sliding. *Wear* **100** 453-476
- Komanduri, R, Hou, Z.B 2001 Analysis of heat partition and temperature distribution in sliding systems. *Wear* **251** 925-938
- Majcherczak, D 2007 Tribological, thermal and mechanical coupling aspects of the dry sliding contact. *Tribology International* **40** 834-843
- Ryhming, I.L 1979 On temperature and heat source distributions in sliding contact problems. *Acta. Mech.* **32** 261-274
- Sawyer, G.W, Tichy, J 2001 Lubrication with granular flow : continuum theory, particle simulation, comparison with experiment. *J. Tribology* **123** 777-784
- Vargas, L.W, McCarthy, J.J 2002 Stress effects on the conductivity of particulate beds. *Chemical Engineering Science* **57** 3119-3131