



HAL
open science

Une approche multi-échelles de la lubrification

Nicolas Fillot, Hassan Berro

► **To cite this version:**

Nicolas Fillot, Hassan Berro. Une approche multi-échelles de la lubrification. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01393697

HAL Id: hal-01393697

<https://hal.science/hal-01393697>

Submitted on 10 Nov 2016

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Une approche multi-échelles de la lubrification

N. Fillot¹, H. Berro¹

¹ Université de Lyon, CNRS, INSA-Lyon
LaMCoS UMR5259, F-69621, France
nicolas.fillot@insa-lyon.fr

Résumé – Une discussion sur les différentes méthodes employées pour modéliser un contact lubrifié est proposée. L’approche classique de Reynolds est confrontée à la fois aux approches plus globales qui décrivent les variations de propriétés dans l’épaisseur du lubrifiant, et plus locales lorsque le film lubrifiant atteint l’ordre de grandeur des molécules qui le composent. Il est montré que chaque modèle est pertinent à son échelle d’investigation, mais qu’un certains nombres d’informations doit être échangé d’un modèle à l’autre.

Mots clés – Lubrification, tribologie, éléments finis, dynamique moléculaire, multi-échelle

1 Introduction

Le bon fonctionnement des systèmes mécaniques, mettant en jeu des solides en mouvements relatifs, est conditionné par une conception adéquate des liaisons, et donc des contacts, engendrant potentiellement du frottement et de l’usure. La technologie usuelle (et très ancienne [1]) pour contrôler ces phénomènes est la lubrification. Celle-ci permet d’intercaler entre les solides en contact un milieu (généralement fluide, mais parfois solide ou pâteux) apte à supporter une charge (normale au contact) et à accommoder la différence de vitesse (tangentielle) des surfaces, évitant ainsi une interaction directe des solides qui engendrerait des dégradations [5].

Depuis les cinquante dernières années, des progrès remarquables ont été fait afin de construire des modèles prédictifs des contacts lubrifiés. Ceci a été rendu possible grâce la résolution numérique (de plus en plus performante) des équations de la lubrification dont l’icône incontournable est l’équation de Reynolds, dérivée des équations de Navier-Stokes dans le cas des films lubrifiants très minces. Dans cette approche, les grandeurs physiques (pression, viscosité, densité) sont moyennées selon l’épaisseur du lubrifiant.

Si la résolution seule de l’équation de Reynolds permet de trouver la répartition de pression dans le fluide et donc de calculer le frottement dans le cas des contacts de géométries conformes (comme les paliers hydrodynamiques) [3], il faut souvent résoudre en plus la déformation des solides dans le cas des contacts non-conformes (comme dans les systèmes came-poussoirs, roulements à bille, etc.) où la pression, concentrée sur une très faible aire de contact, atteint l’ordre du gigapascal [2]. Des méthodes classiques de résolution de ce régime de lubrification se trouveront dans [9] et [13]. Depuis récemment une méthode originale de type éléments finis a été développée au LaMCoS ([6], [7]). Elle permet un couplage fort entre la déformation d’un massif solide et la résolution de l’équation de Reynolds sur un bord du massif (où se produit le contact). Cette méthode ainsi que ses enjeux seront décrit dans le chapitre 2.

Cette approche classique de la lubrification (liée à la résolution de l'équation de Reynolds) montre par ailleurs ses limites lorsqu'elle est appliquée à des conditions particulièrement sévères. En effet, l'allègement actuel des structures et les contraintes environnementales participent à l'emploi de lubrifiants très peu visqueux qui conduisent à des épaisseurs de film de l'ordre du nanomètre. L'emploi de modèles basés sur la mécanique des milieux continus est donc particulièrement mis en doute lorsque le milieu fluide en question est composé de quelques couches de molécules. Pour investiguer la lubrification aux échelles moléculaires, une méthode issue de la physique et de la biologie est adaptée à la lubrification : la dynamique moléculaire. Thompson et al. [12], Gao et al. [4], Jabbarzadeh et al. [10], et plus récemment Martini [11] montrent clairement des comportements antagonistes (à ces échelles) à ce que prédirait la mécanique des milieux continus. Si cette approche est (à l'heure actuelle) incapable de modéliser l'évolution d'un contact dans son intégralité, de la zone d'entrée du lubrifiant (essentielle dans la détermination de l'épaisseur de film) à la zone de sortie où une constriction apparaît, elle permet en revanche une étude locale plus détaillée des contacts lubrifiés à l'échelle moléculaire. Ceci fera l'objet du chapitre 3.

A travers l'exposé des modélisations actuelles de la lubrification, nous montrons comment un contact peut être étudié à différentes échelles. Dans le chapitre 4, nous ferons ressortir comment ces différentes démarches peuvent être complémentaires, avec pour chacune leurs avantages et leurs inconvénients, et comment il serait possible d'intégrer les résultats de l'une dans une autre.

2 La lubrification comme condition limite du problème élastique : un couplage fort en éléments finis pour modéliser le contact EHD

Les modélisations classiques de la lubrification passent par la résolution de l'équation de Reynolds sur une surface (en contact avec un solide antagoniste). Cette équation représente une simplification des équations générales de Navier-Stokes, dans le cas où l'épaisseur de lubrifiant est très petite devant les dimensions du contact, les surfaces sont lisses, le fluide est Newtonien, il adhère aux surfaces, l'écoulement du fluide lubrifiant est isotherme et on considère souvent la compressibilité du fluide ainsi que sa viscosité comme constante (dans le régime hydrodynamique notamment : c'est le cas des paliers, butées, etc.). Comme dit plus haut, les contacts de type bille sur plan ou cylindre sur plan, à cause des pressions concentrées sur une petite surface, mettent en jeu des pressions très élevées (de l'ordre du GPa). Dans ces conditions, la piezoviscosité du lubrifiant ainsi que la déformation (classiquement postulée élastique) des surfaces doivent être considérés (c'est le régime élastohydrodynamique - EHD).

Un moyen efficace de prendre en compte à la fois les deux problèmes d'écoulement du lubrifiant et de déformation des surfaces est de les résoudre dans le même système d'équations. On pose alors le problème d'hydrodynamique (résolution de l'équation de Reynolds) sur un bord du domaine solide où est calculée la déformation équivalente des surfaces (figure 1).

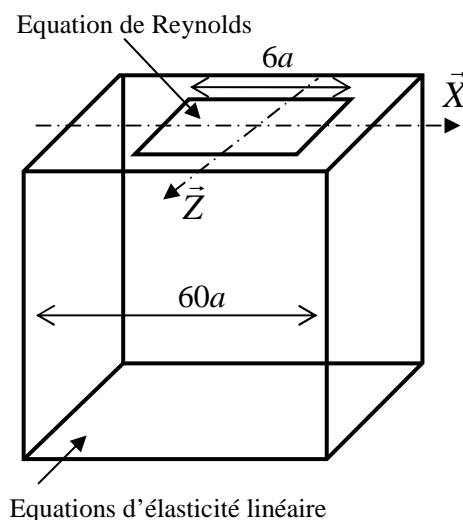


Figure 1 : Représentation des deux domaines de résolution – Déformation élastique (3D, sur le cube) et Reynolds dans la région du contact (2D, une partie du bord du solide). On pose a le rayon de l'air de contact.

Les résultats escomptés sont une « prédiction » du champ de pression et d'épaisseur du lubrifiant à l'intérieur du contact (figure 2), de manière à anticiper les risques d'usure (si les rugosités combinées des surfaces dépassaient l'épaisseur minimale) et de frottement trop important.

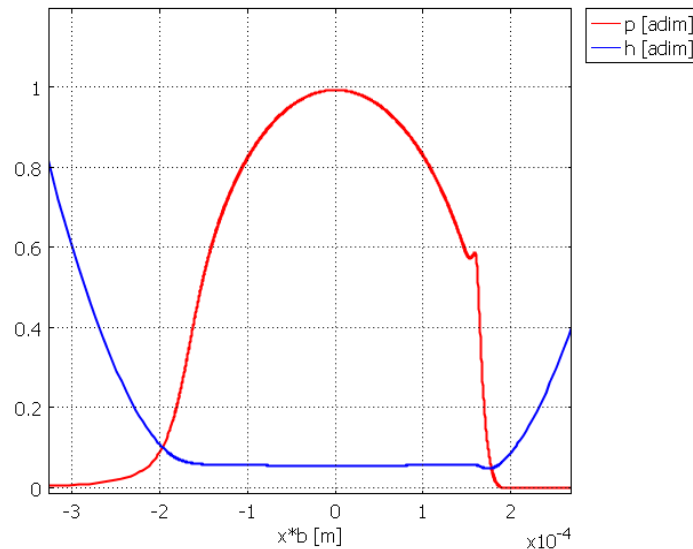


Figure 2 : Champ de pression (p) et d'épaisseur de film (h) adimensionnés dans un contact élastohydrodynamique de type cylindre sur plan.

Il n'est bien sûr pas possible de rentrer ici dans le détail de ce type de modélisation, et le lecteur devrait se référer à [6] et [7].

L'avantage d'une telle modélisation est la simplicité de la mise en œuvre et un nombre réduit de degré de liberté comparé à une description complète du fluide lubrifiant : on passerait alors d'un modèle en deux dimensions (la surface de contact) à un modèle en trois dimensions puisqu'il faudrait considérer l'épaisseur du lubrifiant.

Mais dans un certain nombre de cas, la prise en compte des gradients de propriétés dans l'épaisseur du lubrifiant est indispensable. C'est le cas par exemple pour une rhéologie non-Newtonienne du lubrifiant ou encore une étude thermique du contact, puisque dans ce cas la viscosité du lubrifiant (qui dépend aussi de la température) ne peut plus être considérée comme une constante selon l'épaisseur. Si l'équation de Reynolds peut être modifiée pour tenter de prendre en compte ces nouveaux aspects, un retour aux équations générales de la mécanique des fluides permet d'identifier des effets nouveaux [8].

On voit déjà qu'à l'échelle même de l'air apparente de contact (quelques millimètres carrés) un compromis doit être trouvé entre un calcul efficace (à même d'être intégré dans des codes globaux de comportements de structures complexes) et une description fine de l'épaisseur du lubrifiant, fondamentale par exemple quand on s'intéresse au frottement, où les effets non-Newtoniens et thermiques sont primordiaux.

3 Physique du contact nanométrique : la dynamique moléculaire pour suppléer aux approches de milieux continus

Avec le développement industriel de structures toujours plus sollicitées (charges et vitesses de fonctionnement sévères, interdiction de l'emploi de certains additifs trop polluants), les contraintes de conception des contacts lubrifiés continuent d'augmenter. Si bien qu'on arrive, en utilisant les outils précédents sur des fluides nouveaux, à très faible viscosité par exemple, à prédire des épaisseurs de film

lubrifiant de quelques nanomètres d'épaisseur. A cette échelle (celle de quelques couches de molécules qui constituent le film fluide), on peut alors raisonnablement douter de la validité des équations basées sur la mécanique des milieux continus.

On est alors amené à construire de nouveaux outils pour décrire finement l'écoulement de chaque molécule de lubrifiant à l'intérieur du contact, telle la méthode de dynamique moléculaire classiquement employée, d'un principe relativement simple, mais qui nécessite de bien connaître les lois physiques d'interaction entre particules. La description des phénomènes locaux pourra fournir une réelle interprétation des résultats macroscopiques comme le frottement (qui est en fait la somme de forces élémentaires qu'applique le fluide sur les surfaces), mais à cause des limitations des machines de calcul actuelles (et pour encore quelques décennies au moins !) il n'est pas possible de représenter par de telles méthodes l'ensemble du contact, de quelques nanomètre d'épaisseur, mais aussi de quelques millimètres de longueur ou de largeur. Une méthode astucieuse consiste néanmoins à représenter une petite partie de l'intérieur du contact, dans la zone de très forte pression (voir figure 2), principale responsable du frottement. On considère alors dans ce petit domaine (la partie étudiée du contact fait seulement quelques nanomètres de long) que le contact est infiniment long. Des frontières périodiques sont alors appliquées sur les bords de ce contact élémentaire : chaque atome qui sort d'un côté rentre instantanément par le côté opposé. On représente alors sur la figure 3 une simulation typique de dynamique moléculaire pour étudier la lubrification. On notera des conditions sévères en pression (de l'ordre du GPa) et en vitesse (100 m/s) caractéristiques par exemple des micromoteurs. L'épaisseur du lubrifiant étant de quelques nanomètres, le taux de cisaillement imposé au fluide est très grand.

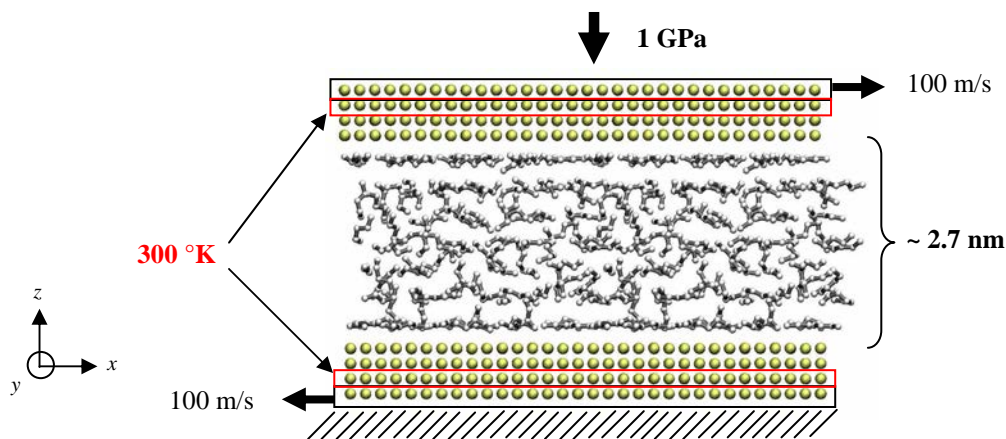


Figure 3 : Représentation d'une simulation dynamique moléculaire pour la lubrification.

On peut alors étudier la réponse du fluide à ce type de sollicitation. On remarque que la densité du lubrifiant est loin d'être constante dans l'épaisseur car les molécules du lubrifiant s'arrangent en couches parallèles aux surfaces et de densités variables (figure 4).

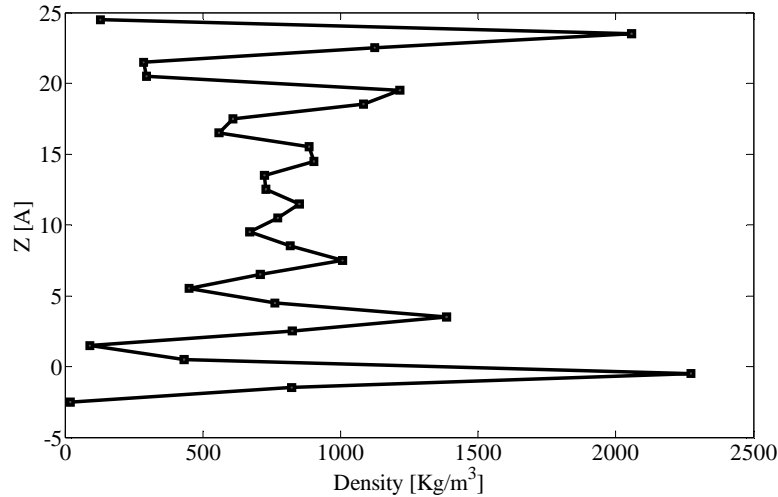


Figure 4 : Profile de densité suivant l'épaisseur d'un film lubrifiant nanométrique.

En particulier, des couches très denses de molécules du lubrifiant se forment au voisinage des surfaces solides, alors que des couches de plus en plus homogènes se répartissent dans l'épaisseur du lubrifiant. Suivant la nature physique et chimique des interactions entre fluide et solide, des glissements importants entre le fluide et les surfaces apparaissent, contrairement aux hypothèses de Reynolds (on lira [4], [10], [11] et [12], parmi d'autres). Cette approche permet également d'appréhender la présence des additifs présents dans les lubrifiants du commerce et dont les effets locaux sont encore mal connus.

A cette échelle, la notion de température est incontournable puisqu'elle représente une moyenne de l'agitation atomique. Classiquement la température est régulée par un thermostat (en imposant une température globalement constante). Mais dans le cas d'une simulation du frottement, l'apport d'énergie mécanique qui se convertit en chaleur provoque une répartition de température non homogène dans le lubrifiant. De gros efforts sont encore à faire pour modéliser correctement l'énergie qui peut s'échapper du contact au travers des surfaces solides. Mais de plus, il n'est pas possible de modéliser la quantité de chaleur qui est emportée avec le fluide à l'extérieur du contact (puisque le modèle inclut des frontières périodiques).

4 Dialogue entre échelles, entre outils, entre différentes physiques

Il apparaît dans cette discussion que chaque modèle peut prendre en compte des phénomènes différents, suivant l'échelle à laquelle on étudie le contact lubrifié. En revanche il paraît impossible de bâtir un modèle global incluant tous les phénomènes listés dans ce papier à cause soit des limites des machines de calculs lorsqu'on veut décrire localement les phénomènes atomiques sur un contact complet, soit de simplifications nécessaires mais trop réductrices.

A la place d'un couplage d'outils qui paraît impossible, il semble nécessaire de développer une complémentarité des différents modèles aux différentes échelles, car les physiques prépondérantes sont différentes dans chacune. L'effet « coin d'huile » à l'entrée du contact doit être décrit avec précision pour prétendre à une bonne modélisation de l'épaisseur de film. L'approche de Reynolds paraît alors bien adaptée. Le frottement est, lui, principalement généré dans la zone de forte pression (et de fort taux de cisaillement), c'est-à-dire dans la zone centrale du contact. Or décrire le frottement ne peut raisonnablement se faire qu'en prenant en compte les effets non-Newtoniens et thermiques ce qui implique une description fine de l'épaisseur du lubrifiant. De plus, les additifs présents dans les lubrifiants commerciaux, bien que représentant un pourcentage très faible de la masse totale, sont souvent déterminants pour le contact (frottement et durée de vie) car ils engendrent des effets locaux aux conséquences lourdes à l'échelle globale. Mais la description de ces effets locaux par une méthode comme la dynamique moléculaire suppose connu l'épaisseur de lubrifiant et la quantité de chaleur qui peut être évacuée à la sortie du contact.

Notre démarche multi-échelles s'accompagne de fait d'une démarche multi-méthodes au vu des particularités fondamentales (de nature physique différentes) prédominant à chaque échelle. Il semble donc nécessaire de mener de front le développement de ces méthodes complémentaires pour appréhender la réalité du contact lubrifié.

Références

- [1] D. Dowson *History of Tribology*, 2nd edition, Professional Engineering Publishing, Londres et Bury St Edmonds, UK, 1998.
- [2] D. Dowson, G.R. Higginson. *Elastohydrodynamic lubrication, the fundamentals of roller and gear lubrication*, Pergamon Press, Oxford, UK, 1966.
- [3] J. Frêne, D. Nicolas, B. Degueurce, D. Berthe, M. Godet. *Hydrodynamic lubrication – bearings and thrust bearings*, Dowson D. ed., Elsevier, Amsterdam, 1990.
- [4] J. Gao, W.D. Luedtke, U. Landman. Structure and solvation forces in confined films: Linear and branched alkanes, *J. Chem. Phys.*, vol. 106, n°10, pp. 4309-4318, 1997.
- [5] M. Godet. Third-bodies in Tribology, *Wear*, vol. 136, pp. 29-45, 1990.
- [6] W. Habchi, D. Eyheramendy, P. Vergne, G. Morales-Espejel, A full-system approach of the elastohydrodynamic line/point contact problem, *J. Tribol.*, vol. 130, article 021501, 10p, 2008.
- [7] W. Habchi, D. Eyheramendy, S. Bair, P. Vergne, G. Morales-Espejel. Thermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts using a newtonian/generalized newtonian lubricant, *Tribol. Lett.*, vol. 30, pp. 41-52, 2008.
- [8] M. Hartinger, M.-L. Dumont, E. Ioannides, D. Gosman, H. Spikes. CFD modelling of a thermal and shear-thinning elastohydrodynamic line contact, *J. Tribol.*, vol. 130, article 041503, 16p, 2008.
- [9] T.G. Hughes, C.D. Elcoate, H.P. Evans. Coupled solution of the elastohydrodynamic line contact problem using a differential deflection method, *Proc Instn Mech Engrs*, vol. 214, pp. 585–598, 2000.
- [10] A. Jabbarzadeh, J.D. Atkinson, R.I. Tanner. Nanorheology of molecularly thin films of n-hexadecane in Couette shear flow by molecular dynamics simulation, *J. Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 77, pp. 53-78, 1998.
- [11] A. Martini. *Molecular modelling and continuum analyses of thin film interfaces*, Ph. D. thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA, 2007.
- [12] P.A. Thompson, M.O. Robbins. Shear flow near solids: Epitaxial order and flow boundary conditions, *Phys. Rev. A*, vol. 41, n°12, pp. 6830-6837, 1990.
- [13] C.H. Venner, A.A. Lubrecht. *Multilevel Methods in Lubrication*, Dowson D. ed., Elsevier, Amsterdam, 2000.