



HAL
open science

Endommagement et comportement en frottement de matériaux biphasiques

Matthieu Champagne, Mathieu Renouf, Yves Berthier

► **To cite this version:**

Matthieu Champagne, Mathieu Renouf, Yves Berthier. Endommagement et comportement en frottement de matériaux biphasiques. 11e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2013, Giens, France. hal-01722046

HAL Id: hal-01722046

<https://hal.science/hal-01722046v1>

Submitted on 2 Mar 2018

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.

Public Domain

Endommagement et comportement en frottement de matériaux biphasiques

Matthieu CHAMPAGNE^{1*}, Mathieu RENOUF², Yves BERTHIER¹

¹ Université de Lyon, CNRS LAMCOS, INSA-Lyon, UMR 5259, matthieu.champagne@insa-lyon.fr, yves.berthier@insa-lyon.fr

² Université Montpellier 2, CNRS LMGC, UMR 5508, mathieu.renouf@univ-montp2.fr

* Auteur correspondant

Résumé — Des modèles de matériau biphasique utilisant la méthode des éléments discrets sont construits, offrant la possibilité d'étudier (sous sollicitations tribologiques) tant leur endommagement que leur usure. Cette modélisation répond à la conceptualisation du triplet tribologique, montrant l'influence de la couche de troisième corps sur le « contact » dans le cadre du modèle. Elle correspond également à des observations réalisées sur des matériaux de friction hétérogènes type garniture de frein, et constitue une première étape dans l'étude paramétrique du comportement de ce type de matériau en fonction d'une définition plus précise de sa microstructure et de ses propriétés.

Mots clés — DEM, CZM, usure, matériau biphasique

1. Introduction

Le frottement et l'usure sont des problèmes industriels de premier plan, et les besoins d'études tant expérimentales que numériques, souvent couplées car complémentaires, sont importants. En effet, les études numériques permettent de compenser certaines limitations de la tribologie expérimentale (difficultés d'instrumentation, observation du contact post-mortem, ...) tandis que les études expérimentales sont irremplaçables pour nourrir les paramètres des modèles numériques et réaliser les comparaisons à la réalité du mécanisme étudié. D'un point de vue numérique, la modélisation des phénomènes d'usure reste limitée, la prise en compte de tous les phénomènes la régissant (propriétés des matériaux, caractéristiques des surfaces, mécanisme environnant,...) pouvant se révéler difficile [1].

De fait, les modèles numériques tribologiques (voir [6]) sont majoritairement des modèles macroscopiques de contact, faisant intervenir une modélisation par éléments finis. Dans ce type de modèles il est possible de trouver deux écueils principaux : un coefficient de frottement choisi arbitrairement et une usure modélisée comme un simple enlèvement de matière, celle-ci disparaissant ensuite du contact. Si le frottement est parfois pris sous la forme d'une loi (pouvant provenir d'essais expérimentaux) dépendant de paramètres comme la température, il reste cependant un paramètre d'entrée fixé et non le résultat d'un phénomène mécanique modélisé ; or il semble évident que dans une simulation à visée tribologique un paramètre tel que le frottement doit être l'objet de toutes les attentions. Concernant l'usure, les modèles les plus courants proposent une modélisation par éléments finis où l'usure répond à une loi type Archard, dans laquelle le volume usé est proportionnel, entre autre, à la pression de contact ; les corps et maillages sont donc actualisés en fonction de l'usure du matériau, le principal problème rencontré étant que la « matière usée » disparaît du modèle ; il est cependant maintenant communément admis que les particules d'usures présentes dans le contact jouent un rôle non négligeable sur l'usure des corps ou le coefficient de frottement [6].

C'est dans cette optique que les modèles numériques ici présentés ont été conçus. Ils ont pour objectif de modéliser de manière explicite l'endommagement et l'usure d'un volume élémentaire microscopique de matériau, la finalité de ces modèles étant de pouvoir en tirer des paramètres comme un coefficient de frottement qui serait une donnée de sortie ; ce frottement serait alors bien un résultat de phénomènes mécaniques et de l'historique d'endommagement du matériau. Ces modèles, pour l'instant en deux dimensions, peuvent également se révéler être des outils de compréhension de l'usure vis-à-vis d'essais expérimentaux, constituant en quelque sorte un banc d'essai d'expérimentations numériques. Le matériau ici représenté est un matériau modèle de friction hétérogène, ce type de matériau étant par exemple utilisé dans les secteurs du freinage automobile et aéronautique.

La méthode numérique choisie pour réaliser cette modélisation est la méthode des éléments discrets (Discrete Element Method, DEM [3]) avec gestion des interactions par modèle de zones cohésives (Cohesive Zones Model, CZM [5]). Le matériau est ainsi représenté sous la forme d'une collection de particules liées entre elles par des interactions endommageables, ce qui permet d'étudier de manière explicite l'endommagement et la fissuration du matériau (destruction des liens inter-particulaires) et l'usure du matériau (détachement de particules). Les modèles réalisés permettent d'étudier les possibilités offertes par ces méthodes en termes de modélisation du phénomène d'usure du matériau soumis à des sollicitations tribologiques données. L'approche discrète est utilisée ici non pas pour représenter un milieu discret par nature mais pour s'en faire une représentation discrète, tout en s'assurant que la structure possède un comportement volumique équivalent. Via cette approche, l'évolution de l'endommagement du matériau, sa dégradation ainsi que la circulation dans le contact des particules détachées sont donc pris en compte.

Le plan de la présente contribution s'organise comme ci : une première partie détaillera la méthode numérique choisie ainsi que la constitution et construction des modèles réalisés. Certains résultats seront ensuite présentés, tant d'un point de vue numérique (études paramétriques) que tribologique (scenarii d'endommagement et d'usure des modèles). Enfin, une dernière partie inclura une discussion sur les résultats obtenus, ainsi que les perspectives pour la suite de travaux sur ces modèles.

2. Méthode numérique

2.1. Non Smooth Contact Dynamic (NSCD) et méthode DEM

L'utilisation des approches DEM pour des modélisations tribologique n'est pas nouvelle et a déjà été mise en œuvre dans certaines études. Pour la présente étude, la méthode numérique utilisée est l'approche Non-Smooth Contact Dynamic (NSCD) [4]. Cette méthode, souvent mise en avant dans l'étude de matériaux granulaires, utilise une discrétisation implicite de l'équation de mouvement écrite pour une collection de particules. Le principe général de la méthode repose sur le fait que les interactions entre particules ne sont pas traitées au niveau même des particules, mais au niveau de chaque contact. Ceci permet de transposer et de réécrire l'équation de la dynamique classique, à chaque pas de temps, au niveau de chaque contact avec le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} Wr - u = b \\ \text{contact}_\alpha(u_\alpha, r_\alpha) = \text{vrai}, \alpha = 1, n_c \end{cases}$$

où W est l'opérateur de Delassus qui contient les informations relatives aux particules (mouvements et points de contact), u et r sont les vecteurs respectivement de vitesse relative et de force de contact pour tous les points de contact de toutes les particules. Le vecteur b représente les vitesses relatives calculées à partir des forces extérieures. La discrétisation temporelle est réalisée par une θ -méthode tandis que le problème de contact est résolu en utilisant un algorithme de type Gauss-Seidel. Le programme LMGC90 [2], conçu autour de la méthode décrite précédemment, est utilisé. Ce

type de méthode numérique étant très couteuse, les calculs sont réalisés en utilisant une version parallèle du solveur ce qui diminue le temps de calcul des simulations.

2.2. Modélisation du matériau

Le matériau étudié est représentatif d'un matériau de friction modèle, de constitution hétérogène. Ce type de matériau composite est très utilisé dans les applications de freinage automobile ou aéronautique, où les caractéristiques (thermiques, mécaniques, chimiques...) couplées de ses différents composants et de sa microstructure permettent d'atteindre les niveaux de performance requis. Cependant, la présence de ces hétérogénéités génère un comportement tribologique complexe : c'est justement l'influence de la présence et de la répartition de ces hétérogénéités que l'on se propose de mettre en avant à travers le modèle présenté. Le modèle, en deux dimensions, représente un contact fermé (utilisation de conditions aux limites périodiques) soumis à des sollicitations tribologiques classiques (force normale et vitesse de cisaillement).

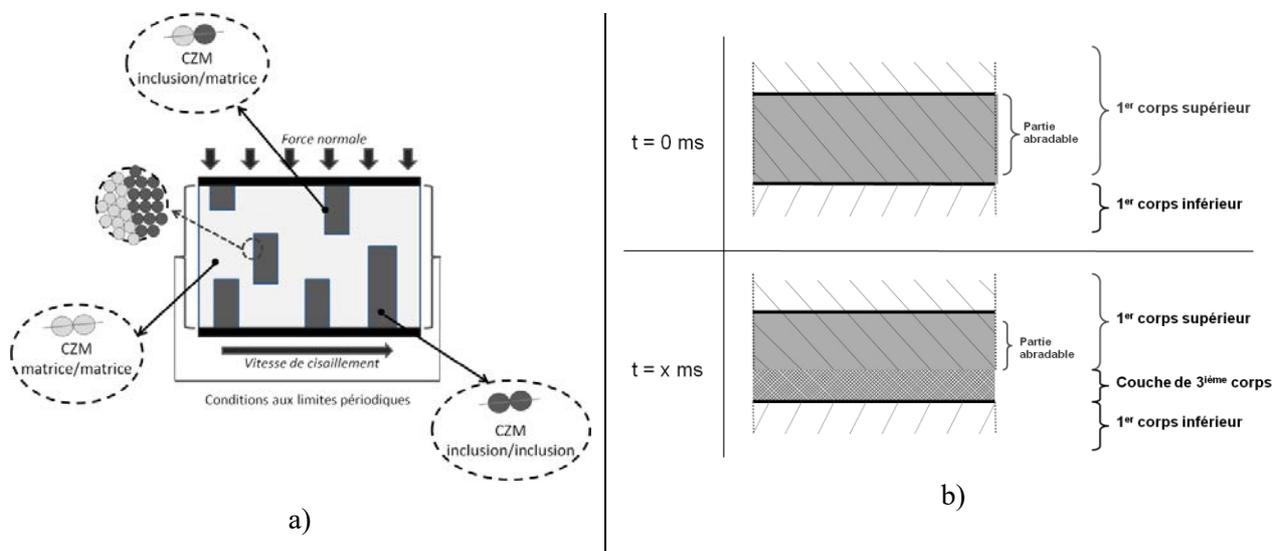


Fig. 1. (a) principe du modèle granulaire et implémentation des lois CZM ; (b) 1^{er} corps et 3^{ème} corps dans la modélisation à l'instant initial et à un instant x

Comme il a été précisé précédemment, le matériau (ou 1^{er} corps selon la conceptualisation du triplet tribologique) est représenté sous la forme d'une collection discrète de particules (figure 1). Ces particules sont rigides : bien qu'il soit tout à fait possible de les rendre déformables, pour des raisons de temps de calcul et en première approche il a été décidé de ne pas les considérer ainsi. La calibration des interactions inter-particulaires est donc primordiale puisque c'est via ces interactions qu'est représentée la tenue mécanique du matériau ; les interactions de type CZM (figure 2) sont utilisées dans ce cas de figure. Ces lois possèdent une partie élastique ainsi qu'une partie visco-plastique endommageable. Elles sont régies par les paramètres suivants : C_n et C_t (raideur normale et tangentielle), w (énergie de décohésion), b (viscosité liée à la cohésion), et μ (coefficient de frottement local entre deux particules). La variable d'endommagement β est introduite, permettant de caractériser l'état de la liaison par une valeur comprise entre 1 (liaison intacte) et 0 (liaison cassée). Dans le cas de figure ici considéré, c'est le paramètre C_n (égal à C_t) qui est choisi comme variable et dont l'effet est étudié.

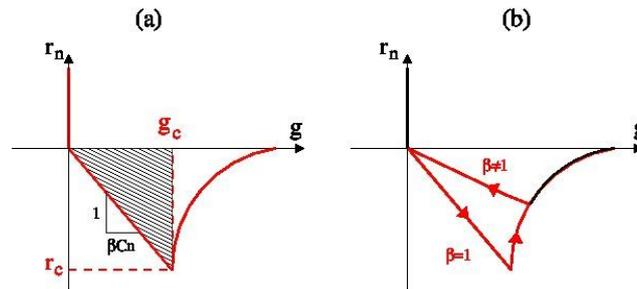


Fig. 2. Interaction de type CZM ; (a) zone élastique et (b) zone visco-plastique avec valeur de β

Lorsque les particules sont détachées et circulent dans le contact (et constituent le 3^{ième} corps selon la conceptualisation du triplet tribologique), d'autres types d'interactions entrent en jeu : lois de choc simples et/ou lois d'adhésion permettant aux particules de former des agrégats temporaires. Ce dernier type d'interaction permet d'introduire dans le modèle un aspect physico-chimique, cette adhésion pouvant notamment être liée aux problèmes de réactivité de surface, dont l'influence a été montrée dans les problèmes tribologiques.

2.3. Caractéristiques du modèle

Concernant le modèle de matériau, il est choisi de prendre des inclusions plus raides que la matrice qui les environne, caractéristique se retrouvant dans beaucoup de composite de friction. Les inclusions représentent entre 10 et 20 % de fraction volumique du matériau. Les interactions CZM sont calibrées suivant la taille des particules utilisées (elles même choisies en premier lieu en fonction des tailles de particules de 3^{ième} corps généralement observées sur le type de matériau modélisé), et avec un contraste suffisamment important entre la matrice et les inclusions. L'interface entre inclusion et matrice est également modélisée avec une loi CZM propre. Les sollicitations tribologiques sont appliquées via des parois supérieures et inférieures : la force normale est calibrée en fonction des efforts habituellement observés dans les systèmes de freinage à cette échelle, de même que la vitesse de cisaillement, mais également de manière à observer un endommagement suffisant dans la durée de sollicitation simulée (de l'ordre de la milliseconde). Les paramètres du modèle sont résumés sur le tableau 1.

Longueurs de l'échantillon	100, 150, 200 μm	Temps de simulation	0,4 à 1 ms
Hauteurs de l'échantillon	50, 100, 150 μm	Pas de temps	10^{-7} ms
Diamètre moyen des particules	0,5 μm	Raideurs C_n (1 ^{er} corps)	$10^3, 10^5, 10^7$ MPa
Nombre de particules	10000 à 90000	Energie de décohésion (1 ^{er} corps)	10^{-2}
Vitesse de cisaillement	1 m/s	Forces d'adhésion (3 ^{ième} corps)	$0, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}$
Force normale	1 N		

Tableau 1. Valeurs utilisées pour les principaux paramètres des modèles

3. Résultats

3.1. Outils de mesures numériques

Différents paramètres sont calculés lors des simulations. Le coefficient de frottement global est calculé comme le rapport de la somme des forces tangentielles r_x entre particules de la paroi inférieure et la force normale F appliquée sur la paroi supérieure :

$$\mu(t) = \frac{\sum_{i=1}^n r_x^i(t)}{F}$$

Un paramètre d'endommagement global est également calculé comme étant la moyenne des β liés aux interactions dans le 1^{er} corps sur l'ensemble de la géométrie. Ainsi, un β de 1 sur la géométrie montrera que celle-ci est intacte ; plus cette valeur diminuera, plus la géométrie sera endommagée et/ou « usée ». Cet endommagement β peut également être calculé au niveau de chaque particule : une valeur de 1 correspond alors à une particule ayant toutes ses interactions intactes avec ses voisines.

Les tenseurs de contraintes équivalentes sont également calculés de la manière suivante :

$$\sigma_{ij}(P) = \frac{1}{vol(P)} \sum_{\alpha \in L_p} r_i^\alpha l_j^\alpha$$

où r^α est la force exercée au contact α , l^α la distance entre ce contact et le centre de la particule P , et L_p la liste des contacts associés à cette particule. Dans ce matériau modèle, les tenseurs peuvent être calculés pour les particules appartenant aux différents éléments de microstructure mais aussi pour celles appartenant au 1^{er} ou 3^{ème} corps ; le rapport entre la partie hydrostatique et déviatorique donnant alors une idée de où est accommodé le mouvement relatif.

3.2. Influence de la discrétisation (statistiques)

Afin de vérifier si l'empilement initial des particules introduit un biais, des études paramétriques sont menées sur ce point. Les mêmes géométries, dotées des mêmes paramètres CZM, sont créées à partir de 10 empilements différents de particules ayant toutes la même granulométrie. Le tracé comparatif des endommagements calculés (voir figure 3 pour différents niveaux d'adhésion dans le 3^{ème} corps, voir 3.4) montre que l'empilement n'introduit pas de biais, les écarts types étant relativement faibles (au maximum 0.08 %).

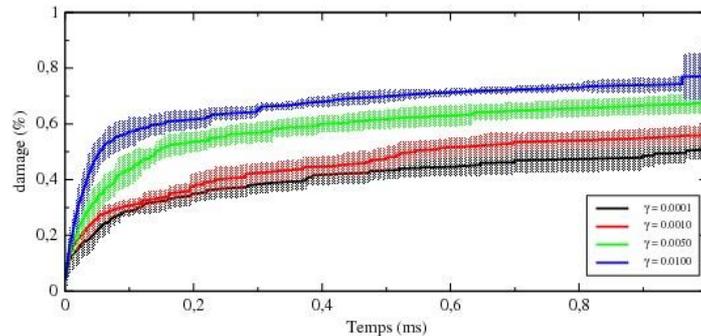


Fig. 3. Tracé de l'endommagement et de l'écart type pour la géométrie 2 avec différentes valeurs d'adhésion, chacune pour 10 empilements différents

3.3. Usure de matériaux homogènes et hétérogènes

L'usure de matériaux homogènes placés dans les mêmes conditions qu'un modèle hétérogène est étudiée. Ce matériau est rendu isotrope par le réglage des paramètres CZM à des valeurs identiques partout dans le matériau. Deux modèles sont étudiés : l'un avec une raideur C_n de 10^5 MPa et l'autre avec une raideur de 10^7 MPa. Une comparaison est effectuée avec un matériau hétérogène, pour lequel la valeur de 10^5 correspond aux liaisons dans la matrice et entre la matrice et l'inclusion tandis que la valeur de 10^7 MPa correspond aux liaisons au sein des inclusions. Les résultats en terme d'endommagement globaux sont présentés figure 4.

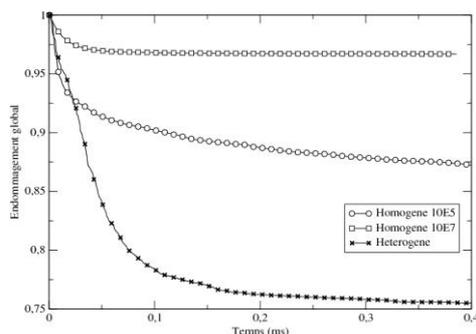


Fig. 4. Niveau endommagement homogène / hétérogène

Il est possible de faire deux observations : la stabilisation de l'endommagement au-delà d'un certain temps, et les niveaux d'endommagements atteints différents selon les paramètres employés. Concernant la stabilisation, celle-ci est visible tant pour les matériaux homogènes qu'hétérogènes et est due à l'établissement d'une couche de 3^{ème} corps sous le 1^{er} corps, qui permet l'accommodation du mouvement relatif. La mise en place de cette couche est facilitée par l'aspect fermé du contact (dû aux conditions aux limites périodiques), les particules de 3^{ème} corps étant conservées en son sein. En ce qui concerne les niveaux d'endommagement, il est possible de remarquer que le niveau atteint par le matériau hétérogène n'est pas encadré par les matériaux homogènes. La microstructure joue donc un rôle propre dans le scénario d'usure, ce qui implique qu'il n'est pas possible de prévoir ce scénario sur la base des seuls paramètres CZM ; ce rôle sera explicité dans les parties suivantes.

3.4. Scénarii d'endommagement avec et sans adhésion

Différentes géométries sont étudiées (voir figure 5), chacune étant caractérisée par une implantation spécifique des inclusions tout en gardant deux paramètres inchangés : un même taux surfacique global et un même nombre d'inclusions débouchantes à la surface frottante. L'un des principaux paramètres étudiés est l'influence de la longueur des inclusions débouchantes. Il est rapidement possible de constater que les scénarii de comportement pour ces géométries comportent les mêmes phases que vues précédemment : une première phase d'endommagement important suivi d'une stabilisation à un niveau d'endommagement différent pour chaque géométrie.

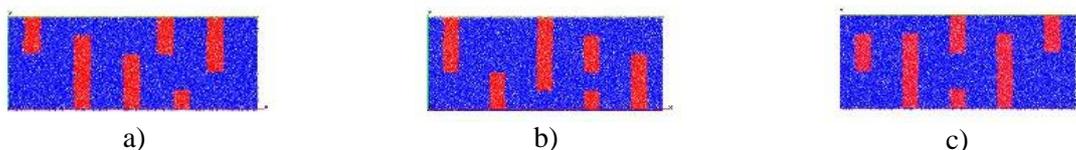


Fig. 5. Géométries utilisées (a : géométrie 1 avec inclusions variées, b : géométrie 2 avec inclusions débouchantes courtes, c : géométrie 3 avec inclusions débouchantes longues)

Il apparaît vite que les géométries possédant des inclusions débouchantes plus courtes voient leur endommagement se stabiliser plus rapidement et à un niveau moins important que les géométries possédant des inclusions débouchantes longues (voir figure 6 A). La matrice fournit la majeure partie des particules de 3^{ème} corps, et la présence de longues inclusions empêche la formation et la circulation du film de particules en créant des « effets de coin » dans lesquels viennent se bloquer certaines particules. Or ce film constitue une protection pour le 1er corps en accommodant la vitesse relative, ce qui explique la stabilisation en endommagement observée. La constitution du film peut être observée sur la figure 6 B.

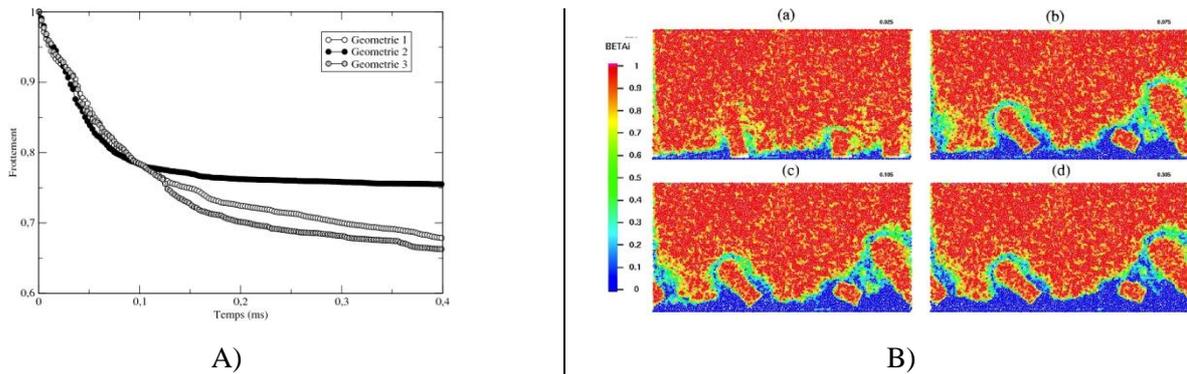


Fig. 6. (A) endommagement des 3 géométries avec les paramètres 575, (B) évolution du paramètre β associé à chaque particule pour la géométrie 2 aux temps : (a) $t = 0.025$ ms, (b) $t = 0.075$ ms, (c) $t = 0.1$ ms et (d) $t = 0.3$ ms

La transition de site d'accommodation du 1^{er} corps vers le 3^{ème} corps peut être vue sur la figure 7 prenant pour exemple la géométrie 2, paramètres 575, qui représente le tracé du coefficient de frottement et des paramètres q/p pour le 1^{er} et 3^{ème} corps. Il est visible que ce coefficient de frottement est proche de la valeur de q/p du 1^{er} corps pour les premiers instants de la simulation, signe que l'accommodation se réalise dans le 1^{er} corps par endommagement de ce dernier. Lorsque le film de 3^{ème} corps est créé, il devient site d'accommodation par cisaillement et sa valeur de q/p rejoint celle du frottement.

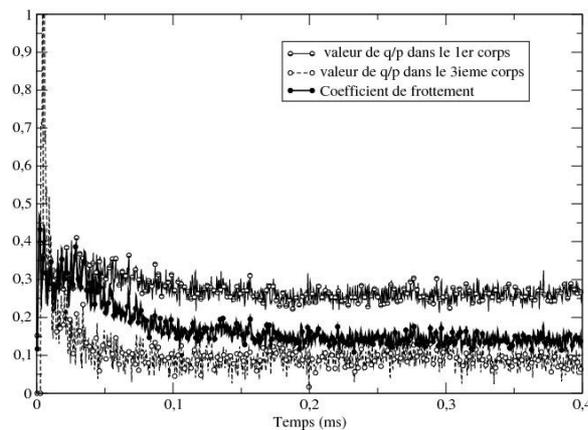


Fig. 7. Comparaison du frottement aux valeurs de q/p dans le 1^{er} et 3^{ème} corps

Il est cependant possible de noter que l'établissement final de cette couche de 3^{ème} corps pour toutes les géométries conduit à un coefficient de frottement final global identique pour toutes ces géométries. Pour remédier à ce problème, les forces d'adhésion sont introduites dans le 3^{ème} corps, permettant aux particules de former des agrégats et de rendre le milieu moins « fluide ». Ce phénomène est observé physiquement dans les contacts où la physico-chimie est amenée à jouer un rôle (une ref?). La figure 8 montre les niveaux de frottement obtenus avec différents niveaux d'adhésion, pour une même géométrie ; ce niveau est également différents pour chaque géométrie puisque dépendant par exemple des épaisseurs de film de 3^{ème} corps formé. Il est également constaté qu'un niveau d'endommagement donné est atteint plus rapidement avec une forte adhésion, mais que la hiérarchie entre géométries n'est pas modifiée : ce paramètre d'adhésion constitue donc un paramètre « extérieur » influant sur le frottement et l'endommagement, mais ne remet pas en cause les caractéristiques intrinsèques aux géométries quant à leur comportement en usure.

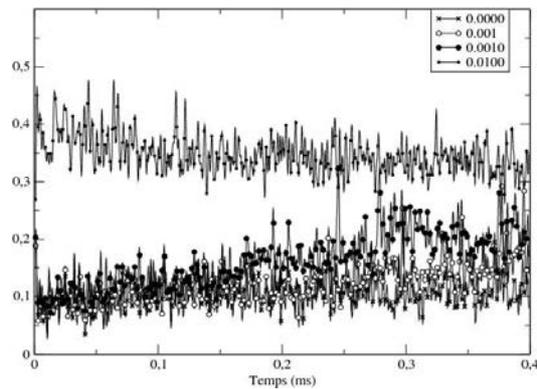


Fig. 8. Coefficients de frottement calculés pour la géométrie 2, paramètres 575, avec différentes valeurs de forces d'adhésion

4. Discussions, perspectives et conclusions

Ces premiers modèles valident la méthode numérique choisie en montrant qu'elle permet des études tribologiques locales prometteuses, incluant l'endommagement et une forme d'usure du matériau, la circulation des particules de 3^{ième} corps dans le contact, l'influence de paramètres extérieurs représentatif d'une action physico-chimique sur cette usure, ainsi que l'obtention de coefficient de frottement en tant que paramètre de sortie, résultat de phénomènes modélisés.

Certaines limites et points durs peuvent cependant être mis en avant ; il est par exemple nécessaire de rappeler que les particules comme les interactions qui les lient sont purement numériques et nécessitent un recalage. Ce travail consiste en la reproduction numérique d'essais expérimentaux de caractérisation, les paramètres locaux étant recalés pour donner au modèle le comportement global vu expérimentalement. Le fait que le modèle soit en deux dimensions (par souci de simplification et de gain de temps de calcul) pose également d'évidents soucis de représentativité, l'effet de « racloir » des inclusions étant par exemple caricaturés par ce choix de modélisation. Le contact est également fermé, aucune éjection de particule n'ayant lieu : ceci influe fortement sur la résultat en terme d'usure, l'établissement du film de 3^{ième} corps pouvant alors être plus long tandis que les effets de coin peuvent devenir bénéfiques en constituant des réserves de particules pour alimenter le film. La mise en place d'un débit d'éjection de particules fait partie des perspectives de travaux, ainsi qu'une étude paramétrique sur la taille du Volume Élémentaire Représentatif (VER) à utiliser. À l'heure actuelle, le volume choisi semble en effet trop petit par rapport à la taille des inclusions, ce qui mène à un volume d'usure trop important. D'autres travaux sont également à mener du point de vue des interactions dans le 3^{ième} corps, le calibrage des forces d'adhésion restant à réaliser.

Références bibliographiques

- [1] Y. Berthier. Background on friction and wear. *Handbook of Materials Behavior Models*, Lemaître Academic Press, pages 676-699, 2001.
- [2] F. Dubois, M. Jean & Al., LMGC90, 10e colloque national en calcul des structures, 2011
- [3] H.G. Elrod and D.E. Brewe. Numerical experiments with flows of elongated granules. *Tribology Series 21*, pages 219-226, 1991.
- [4] M. Jean. The non smooth contact dynamics method. *Computational Methods in applied mechanics engineering 177*, pages 235-257, 1999.
- [5] F. Perales, S. Bourgeois & Al. Two field multibody method for periodic homogenization in fracture mechanics of nonlinear heterogeneous materials. *Engineering Fracture Mechanics 75*, pages 3378-3398, 2008.
- [6] M. Renouf, F. Massi & Al. Numerical tribology of a dry contact, *Tribology International 44*, pages 834-844, 2011.