Tribologie numérique - Chroniques des troisièmes corps solides

Mathieu Renouf

▶ **To cite this version:**

Mathieu Renouf. Tribologie numérique - Chroniques des troisièmes corps solides : du discret au continu et vice et versa. Mécanique des solides [physics.class-ph]. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2015. tel-02088165

HAL Id: tel-02088165
https://hal.science/tel-02088165

Submitted on 2 Apr 2019

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.

ACADÉMIE DE MONTPELLER

UNIVERSITÉ MONTPELLIER II

— SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC —

HABILITATION

A DIRIGER DES RECHERCHES

présentée à
l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc de Montpellier

- TRIBOLOGIE NUMÉRIQUE - CHRONIQUES DES TROISIEMES CORPS SOLIDES

du discret au continu et vice et versa

par

RENOUF Mathieu

SPECIALITE :
Mécanique, Génie Mécanique et Génie Civil

soutenue le 15 06 2015 devant la Commission d'examen composé de

TICHY John	Professeur	Rapporteur
MOLINARI Jean-François	Professeur	Rapporteur
LEBON Frédéric	Professeur	Rapporteur
DENAPE Jean	Professeur	Examinateur
MISCHLER Stéphano	Professeur	Examinateur
MONERIE Yann	Professeur	Examinateur
BERTHIER Yves	Directeur de Recherche CNRS	Examinateur

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil
UMR 5508 CNRS / Université Montpellier 2

Sommaire

Avant Propos 6

Synthèse administrative 8

Lexique 8

1 Curriculum Vitae 9

1.1 Formation . . . 10
1.2 Enseignement et responsabilités collectives . . . 10
1.2.1 Enseignements . . . 10
1.2.2 Participation à la vie des laboratoires . . . 11
1.2.3 Animation de projets . . . 12
1.2.4 Participations à l'organisation de symposiums et workshops . . . 12
1.2.5 Participation à des conseils scientifiques et autres commissions . . . 13
1.2.6 Participation à des comités de lecture . . . 13

2 Encadrements et formation 14

2.1 Masters recherche . . . 14
2.2 Thèses soutenues . . . 15
2.2.1 Thèse David Richard . . . 15
2.2.2 Thèse Hong-Phong Cao . . . 15
2.2.3 Thèse Coumba Mbodj . . . 16
2.2.4 Thèse Viet-Hung Nhu . . . 17
2.2.5 Thèse Matthieu Champagne . . . 18
2.2.6 Thèse Rudy Charlery . . . 19
2.3 Thèses en cours . . . 20
2.3.1 Thèse Jérôme Rivière . . . 20
2.3.2 Thèse Chaoqun Zeng . . . 21
2.3.3 Thèse Komla Apélété Kounoudji . . . 21

2.3.4 Thèse Maria Daniela Villavicencio-Rojas . . . 22
2.4 Post-doctorants encadrés . . . 23
2.4.1 Post-doc Pierre Bernard . . . 23
2.4.2 Post-doc Coumba Mbodj . . . 24
2.4.3 Post-doc Viet-Hung Nhu . . . 24
2.4.4 Post-doc Paul Tafforel . . . 25

3 Partenariats académiques et industriels 26
3.1 Collaboration avec des partenaires académiques . . . 26
3.1.1 Hors cadre . . . 26
3.1.2 Plate-forme LMGC90 . . . 27
3.1.3 GiS InTriG . . . 27
3.2 Participations à des projets de recherche . . . 27
3.2.1 LubFundaments . . . 28
3.2.2 Grease Flow modelling . . . 28
3.2.3 Shuntage . . . 28
3.2.4 Usure Ballast . . . 29
3.2.5 TEXTILUB . . . 29
3.2.6 ANR DiNEET . . . 29
3.2.7 ANR FReIN . . . 30
3.2.8 FUI CARAB . . . 30
3.2.9 ANR MoNumENTUM . . . 30

4 Productions scientifiques 32

Synthèse Scientifique 41

1 Introduction 41
1.1 Bref historique . . . 41
1.2 Point de vue tribologique : existence et unicité ? . . . 42
1.3 Tribologie numérique . . . 43
1.3.1 Mécanismes et premier corps . . . 44
1.3.1.1 Modèles semi-analytiques . . . 44
1.3.1.2 Approches par éléments finis . . . 45
1.3.2 Tribologie numérique discrète . . . 45
1.4 Limites ? . . . 46
1.5 Stratégie . . . 48

2 Troisième corps numérique : réalité ? 50
2.1 Introduction . . . 50
2.2 Ecoulements de troisième corps solides . . . 50
2.2.1 Représentativité ? . . . 50
2.2.2 Frottement macroscopique et cohésion . . . 52
2.3 Enrichissement multi-physiques . . . 55
2.3.1 Modèles multi-physiques discrets : un cadre général ? . . . 55
2.3.2 Linéarités et non linéarités électriques . . . 56
2.3.2.1 Pourquoi étudier le comportement électrique d'un troisième corps ? . . . 56
2.3.2.2 Création d'un modèle électro-mécanique discret . . . 56
2.3.2.3 Validations électriques . . . 57
2.3.2.4 Retour à des considérations tribologiques . . . 59
2.3.3 Conduction et génération de chaleur au coeur d'un contact . . . 60
2.3.3.1 Contexte . . . 60
2.3.3.2 Les grandes lignes du modèle . . . 61
2.3.3.3 Résistance thermique au contact et coefficients de partage 63
2.3.3.4 Vers des modèles prédictifs (?) . . . 64
2.3.4 Physico-chimique . . . 66
2.3.4.1 Contexte . . . 66
2.3.4.2 Modèle scalaire . . . 66
2.3.4.3 Modèle surfacique . . . 69

3 Enrichissement des interfaces tribologiques : interactions avec les premiers corps 74
3.1 En l'absence de débit d'usure . . . 75
3.2 En présence de débits d'usure . . . 76
3.3 Du quantitatif vers le qualitatif ? . . . 78
3.3.1 Identification expérimentale 79
3.3.1.1 des régimes d'instabilités 79
3.3.1.2 des contraintes locales 80
3.3.1.3 ... et des particules de troisième corps. . . . 81
3.3.2 Modèle numérique . . . 82
3.3.3 Discussions . . . 83

4 Transition premiers/troisième corps 86
4.1 Introduction . . . 86

4.2 Pour une analyse locale . . . 87
4.2.1 Mise en place d'une méthodologie . . . 87
4.2.2 Caractérisation locale . . . 88
4.2.3 Extension au matériau composite C/C . . . 90
4.2.3.1 Aspects mécaniques . . . 90
4.2.3.2 Aspects thermiques . . . 94
4.3 Pour un dialogue entre échelles . . . 96

5 Une alternative à Archard ? 100
5.1 A court terme 101
5.1.1 Au coeur du troisième corps : le voyage fantastique ! . . . 101
5.1.2 Interaction premier / troisième corps : l'effet papillon ! . . . 103
5.1.3 Transition premier / troisième corps : évolution ! . . . 104
5.2 Horizon 2025 105

Epilogue 107

Annexe A : PhotoTrib 108

Avant propos

Ce document, faisant également office de mémoire, est rédigé en vue de l'obtention d'une habilitation à diriger des recherches. Lors de son écriture, son titre de travail était *"Rencontre du troisième corps"*, en hommage au film de Steven Spielberg *"Rencontre du troisième type"*, sortie aux états unis en 1977 sous le titre original *"Close Encounters of the Third Kind"*. Pourquoi je mentionne cet hommage, tout simplement parce que pour moi la rencontre avec le "troisième corps" se révèle être presque quelque chose d'extra-terrestre, ou pour les plus rationnels, repose sur un superbe concours de circonstance, qui m'a permis d'obtenir un poste de chargé de recherche CNRS en 2005. Cela a été pour moi une réelle ouverture scientifique car il m'a fallu apprendre à dialoguer avec tout un monde que je ne connaissais que vaguement, pour ne pas dire pas du tout. Cependant extra-terrestre et troisième corps reflètent deux sciences bien différentes : la science-fiction et la science "friction", autrement dit la tribologie ! Et aujourd'hui si certain cherche encore des preuves de l'existence des extra-terrestres, il n'y a pas de doute sur celle du troisième corps, concept auquel ce manuscrit apporte une contribution numérique.

Comme le veut la coutume, ce mémoire est décomposé en deux parties : une partie synthèse administrative et une autre scientifique.

Dans la synthèse administrative, les liens entre mon projet scientifique, détaillé dans la seconde partie, et l'environnement dans lesquels il a été mené sont détaillés. Les différents points qui n'apparaissent pas lors de la synthèse scientifique y sont mis en valeur, que cela soit la partie enseignement (aussi modeste soit-elle) et autres responsabilités collectives, la partie encadrement ou la partie administration de la recherche au travers de la gestion et la participation à différents projets en collaborations avec des partenaires académiques et/ou industriels.

La synthèse scientifique se focalise sur l'axe principal de ma recherche, sans rentrer dans le détail de toutes les ramifications. Celles-ci apparaitront de manière synthétique dans la première partie, car même si elles représentent des activités annexes, elles sont importantes pour prendre du recul, s'ouvrir à d'autres problématiques et ainsi avoir un spectre scientifique le plus large possible.

Synthèse administrative

Lexique

BIPOP	Modélisation, Simulation, Commande et Optimisation des Systèmes Dynamiques Non Réguliers
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CSMA	Computational Structural Mechanics Association
DEA	Diplôme d'Etude Approfondie
DIMA	Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale
EPFL	École polytechnique fédérale de Lausanne
FULS	Frottement, Usure et Lubrification Solide
GMD	Génie Mécanique et Développement
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
INSA	Institut National des Sciences Appliquées
IRSN	Institut de Radioprotection de la Sureté Nucléaire
I2S	Information Structures Systèmes
IS2M	Institut des Sciences et Matériaux de Mulhouse
LaMCoS	Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures
LMA	Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique
LMGC	Laboratoire de Mécanique et Génie Civil
LMGC90	Logiciel de Mécanique Gérant le Contact (en Fortran 90)
MateIS	Materiaux Ingénierie et Science
MBD	Messier-Bugatti-Dowty
MEB	Microscope Electronique à Balayage
MNR	Mécanique Non Régulière
MSSMat	Mécanique des Sols, Structures et Matériaux
PMMD	Physique et Mécanique des Matériaux Divisés
SIAMES	Synthèse d'Images, Animation, Modélisation et Simulation
SISE	Science & Ingénierie des Surfaces et Interfaces
SKF	Svenska Kullagerfabriken
SKF-ERC	SKF Engineering & Research Centre
SKF-MDC	Manufacturing Development Centre
SMC	Systèmes Multi Contacts
SNCF	Société Nationale des Chemins de Fer
SNECMA	Société Nationale d'Etude et de Construction de Moteurs d'Aviation
TMI	Tribologie et Mécanique des Interfaces
UM2	Université Montpellier 2

CHAPITRE 1

Curriculum Vitae

Mathieu Renouf

Né le 23 juin 1975 à Alès (Gard)

Adresse : LMGC - CC 048
Université Montpellier 2
Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier Cedex
Tel : +33 4 67 14 96 35
Fax : +33 4 67 14 45 55
e-mail : Mathieu.Renouf@univ-montp2.fr

Chargé de Recherche CNRS depuis le 1er octobre 2005.
Rattaché au LaMCoS, UMR 5529 (CNRS/INSA-Lyon) de 2005 à 2011.
Depuis septembre 2011, rattaché au LMGC, UMR 5508 (CNRS/UM2).

1.1 Formation

2004-2005 : Post-Doctorat à l'INRIA dans les projets SIAMES (IRISA, Rennes) et BIPOP (INRIA Rhône-Alpes, Grenoble)
Titre : Modélisation Non Régulière du Contact en Contrainte Temps Réel
Supervisé par Georges Dumont et Vincent Acary.

2001-2004 : Doctorat de Mécanique, Université Montpellier 2, effectué au LMGC dans l'équipe SMC
Titre : Optimisation Numérique et Calcul Parallèle pour la Modélisation des Milieux Divisés bi- et tridimensionnels.
Encadré par Pierre Alart et Frédéric Dubois
Soutenu le 14 Septembre 2004 à l'UM2, université ne délivrant plus de mention.

2000-2001 : DEA spécialité Mécanique des Matériaux et des Milieux Complexes des Structures et des Systèmes, Université Montpellier 2, effectué au LMGC dans l'équipe MNR
Titre : Calcul Parallèle pour la Modélisation des Milieux Divisés.
Encadré par Pierre Alart et Frédéric Dubois
Soutenu le 7 juillet 2001 (rang : 1/15).

1999-2000 : Maîtrise d'Ingénierie Mathématique, section Mécanique
Université Montpellier 2.

1998-1999 : Classe préparatoire au CAPES
IUFM de Montpellier.
Non admissible.

1996-1998 : Licence de Mathématique
Université Montpellier 2.

1994-1996 : DEUG Mathématiques et Informatique Appliqués aux Sciences
Université Montpellier 2.

1993-1994 : Baccalauréat Série C
Lycée Jean-Baptiste Dumas, Alès.

1.2 Enseignement et responsabilités collectives

1.2.1 Enseignements

En tant que chercheur CNRS, l'enseignement reste une activité facultative ce qui explique qu'elle n'occupe pas une part importante de mon activité. Cependant, depuis mon recrutement, je me suis efforcé de garder un contact avec les étudiants que cela soit au travers d'une activité d'enseignement ou d'encadrement de projet.

Lors de ma présence au LaMCoS, suite à une réforme des enseignements en 5e année du département GMD (INSA-Lyon), j'ai intégré le groupe d'enseignant du cours RDTrib (Recherche & Développement en Tribologie), mis en place par Yves Berthier et Aurélien

Saulot. Ce cours est commun aux étudiants de 5e année GMD et aux étudiants suivant le MASTER MEGA. J'y interviens depuis 2009 à hauteur de 4h par an.

Dans le cadre du Labex MANUTECH-SISE (Région Rhône-Alpes), je suis intervenu deux années consécutives dans le MASTER SISE à l'ENISE (Saint Etienne), cours dispensé en anglais. Lors de mon changement de laboratoire, j'ai arrêté le cours à cause de la distance.

Même si j'ai peu participé à l'enseignement (en terme de volume horaire), depuis mon recrutement, je me suis efforcé de garder un contact avec les étudiants. J'ai ainsi encadré et co-encadré des projets de fin d'étude (PFE) en 5e GMD à hauteur de 2 PFE par an.

A mon arrivée au LMGC, j'ai souhaité garder le fonctionnement construit à Lyon, en suivant des étudiants de MASTER ou plus récemment des étudiants de Polytech' Montpellier [1].

Dernièrement, j'ai mis un pied dans l'enseignement dans cette structure en étant référant des projets éléments finis pour les 4e année. En plus du suivi de différents stage, je m'occupe de l'organisation des projets (récolte de sujets au niveau des enseignants, animation scientifique et vision générale lors des présentations de fin de projet).

1.2.2 Participation à la vie des laboratoires

Depuis mes années de thèse, je participe à la vie des laboratoires dans lesquels j'évolue. Déjà en deuxième année de thèse, j'ai fait parti du comité d'organisation des Doctiss (en tant que représentant du LMGC), journées consacrées aux doctorants de l'école doctorale I2S, et du comité d'organisation du colloque anniversaire des 80 ans de J.-J. Moreau (2003). Lors de mon post-doctorat, j'ai participé à l'organisation du "SICONOS-DA VINCI joint meeting" (8-9 Juillet 2005, Grenoble, France), colloque réunissant des chercheurs américains et européens travaillant autour de la dynamique non régulière.

A ma prise de fonction au CNRS en octobre 2005, dès mon arrivée dans l'équipe TMI du LaMCoS, j'ai repris la gestion du Groupe de Travail en Tribologie (GTT), groupe de travail s'articulant autour d'une série d'exposés internes à l'équipe. Ceci m'a permis d'avoir rapidement un aperçu de l'ensemble des activités menées jusqu'ici, aussi bien numérique qu'expérimentale. Je me suis occupé de la gestion du groupe jusqu'en 2009.

En 2009, J'ai été en charge de l'organisation des séminaires du laboratoire (1 à 2 séminaires par mois) et de la journée labo, journée hors mur consacrée à la présentation des travaux de recherches des doctorants de 3 années ainsi que des nouveaux arrivants, soit en moyenne une vingtaine d'exposés.

J'ai également été membre de la Commission Informatique de 2006 à 2011. Son but était de gérer la politique informatique du laboratoire, aussi bien sur les aspects techniques que sur les développements de fond. J'ai été d'ailleurs l'un des principaux instigateurs (conjointement avec Jean Michel Dumont et Anthony Gravouil) concernant l'équipement d'un cluster de calcul. Jusqu'à mon départ du LaMCoS, j'ai été responsable de l'axe transverse méthodes numériques, axe dont le but était de réunir et faire dialoguer les chercheurs du laboratoire ayant une sensibilité numérique.

1. Polytech : réseau français des écoles d'ingénieurs polytechniques des universités

En collaboration avec Fabrice Ville, je me suis occupé d'organiser des journées de *sensibilisation à la recherche* pour les étudiants de Génie Mécanique et Développement et les premières années INSA. (février 2010 et février 2011). Durant ces journées, en plus d'exposés synthétiques sur le fonctionnement des différents départements de mécaniques, une visite du laboratoire était organisée. Les étudiants étaient divisés en groupe et guidés par des doctorants. La journée se finissait par une table ronde afin de faire ressortir les questions restées sans réponses lors de la visite ou des différents exposés.

A mon arrivée au LMGC, j'ai pris la responsabilité de l'axe transverse méthodes numériques. L'axe n'a pas été maintenu car il a été très difficile de réunir des personnes autour d'un outil et non d'un thème scientifique.

Je fais aujourd'hui également parti du MIST, Laboratoire de Micromécanique et Intégrité des STructures, laboratoire *sans mur* commun au CNRS et à l'IRSN. Il associe les moyens de recherche des deux organismes dans le domaine des comportements des matériaux et des structures soumis à des ambiances nocives : ceux du Pôle de Sûreté nucléaire-Recherche en sûreté (PSN-RES) de l'IRSN à Cadarache, et ceux du LMGC.

1.2.3 Animation de projets

J'ai été porteur du projet ANR-JC DiNEET de janvier 2009 à décembre 2012. A ce titre, je m'occupais de la gestion complète du projet et de l'animation scientifique, le respect des différentes dates butoirs, les connexions entre les différents groupes de travail et intervenants. J'ai été rédacteur principal du rapport final livré en février 2012 (106 pages) [R1], travail comprenant la rédaction des tâches m'incombant mais aussi la relecture et l'uniformisation des différents parties rédigées par les autres participants. Le projet apparaît dans les faits marquants de l'ANR (voir le rapport annuel en ligne de l'ANR - année 2011).

1.2.4 Participations à l'organisation de symposiums et workshops

J'ai organisé le mini-symposium *Couplage Discret-Continu* dans le cadre du Colloque National en Calcul des Structures, Giens (VAR). En 2009, cela a été en collaboration avec Jean-François Molinari (EPFL) et Frédéric Lebon (LMA), en 2011 et 2013 en collaboration avec Hachmi Ben-Dia (MSSMAT).

En 2011, j'ai participé à l'organisation du Leeds-Lyon Symposium, se déroulant une année à Leeds (Angletterre) et l'autre à Lyon. Ce symposium accueille chaque année environ 120 personnes et ce depuis 1975. Lors de cette manifestation, en plus de l'aide à l'organisation d'un point de vue technique, j'ai organisé en collaboration avec Nicolas Fillot, une session dédiée aux approches multi-échelles dans la modélisation des contacts en lubrification sèche ou fluide.

En 2012, j'ai mis en place, en collaboration avec Guillaume Anciaux (EPFL), le mini-symposium *Multiscale Methods for Contact Mechanics* dans le cadre du 10th World Congress on Computational Mechanics, 8-13 Juillet, Sao-Paulo, Brésil.

Je suis actuellement en charge de l'organisation d'un workshop dans le cadre du laboratoire commun MIST (laboratoire sans mur entre le LMGC et l'IRSN). Le colloque

se déroulera en octobre 2015.

1.2.5 Participation à des conseils scientifiques et autres commissions

J'ai participé en avril et juin 2012 au comité de sélection d'un poste de maître de conférence en mécanique numérique à l'école centrale de Nantes au laboratoire GeM.

J'ai également été expert pour l'ANR pour deux projets de recherche (dans les programme BLANC et MATEPRO), un programme pour la région Nord-Pas de Calais et un programme (AGIR) pour la région Grenobloise.

Depuis Mai 2013, je fais parti du conseil d'administration du CSMA (membre élu).

J'ai également participé en tant qu'examinateur aux jury de thèse de :

- Damien Iceta, *Simulation numérique de la dynamique des systèmes discrets par décomposition de domaine et application aux milieux granulaires*, thèse UM2, soutenue le 16 juillet 2010 ;
- Thi Minh Phuong Hoang, *Optimisation des temps de calculs dans le domaine de la simulation par éléments discrets pour des applications ferroviaires*, thèse UM2, soutenue le 5 décembre 2011 ;
- Mohammed Jebahi, *Couplage modèles discrets - modèles continus pour la simulation d'endommagement induit par choc laser sur la silice*, thèse soutenue le 13 novembre 2013 à l'ENSAM Bordeaux.

1.2.6 Participation à des comités de lecture

Je suis sollicité régulièrement en tant que *reviewer* pour différents journaux (Tribology International, TSI, Tribology Letters, AIP Advances, International Journal of Material Forming, Tribology Transactions, Wear). Ce travail représente au global 4 à 5 *reviews* par an.

CHAPITRE 2

Encadrements et formation

En plus de l'encadrement des projets de fin d'étude présentés précédemment, je me suis impliqué fortement dans l'encadrement d'étudiant de master et de doctorants. Pour ne pas alourdir la lecture, une simple liste à la Prévert présente les étudiants de Master, tandis qu'une présentation un peu plus détaillée est faite pour les doctorants.

2.1 Masters recherche

Thibault Champelovier GMD/INSA-Lyon (2008)
Titre : Modélisation multiphysique d'un contact

Matthieu Champagne GMD/INSA-Lyon (2011)
Titre : Modélisation du comportement tribologique des bi-couches lipidiques

Pierre Garambois GMC/INSA-Lyon (2011)
Titre : Modélisation thermo-mécanique des composites carbone/carbone

Jaume Huguet GMD/ERASMUS (2011)
Titre : Comportement dynamique des structures maçonnées

B. Gezahegn I2S/UM2 (2013)
Titre : Couplage FEM/DEM pour la modélisation d'un pieu dans un sol

2.2 Thèses soutenues

2.2.1 Thèse David Richard

Titre : *Thermique des contacts avec troisième corps solide : modélisation et compréhension des phénomènes de frottement et diffusion de la chaleur par la méthode des éléments discrets*
Thèse INSA-Lyon (Bourse MENRT), soutenue le 5 décembre 2008, 199 pages.
Encadrement : Yves Berthier (dir.), I. Iordanoff (co-dir.), M. Renouf (co-enc.)

Résumé - L'étude thermique des contacts frottants fait face à d'importantes difficultés que ce soit par les approches expérimentales ou les modélisations prédictives. Si dans le premier cas l'impossibilité d'une instrumentation fine in situ limite l'échelle d'étude du contact, les modèles analytiques ou numériques se fondent quant à eux sur des hypothèses réductrices en termes de génération et diffusion de la chaleur. Ils ne permettent ni de prédire les résultats observés expérimentalement ni de les comprendre ou les valider. Le coefficient de frottement ainsi que les coefficients de partage utilisés dans ces modèles, masquent de manière trop forte l'ensemble des phénomènes-clefs qui peuvent décrire plus exactement la thermique locale du contact. Afin de surmonter ce problème, nous avons développé un modèle par éléments discrets qui prend localement en compte à la fois les phénomènes de génération et de diffusion de la chaleur. L'étude des propriétés locales des premiers et troisième corps met en avant toute la complexité des phénomènes thermiques qui ont lieu durant le frottement. Ce modèle permet d'expliquer de manière plus réaliste certains résultats obtenus de manière expérimentale (sauts de températures macroscopiques) tout en clarifiant les concepts de frottement et de partage de la chaleur non plus à partir de lois globales mais en fonction d'une analyse énergétique locale.

Communications associées : [A13],[A14], [Ci21], [Cn11].

↪ *Après un passage dans le groupe Swatch, David Richard est aujourd'hui responsable d'équipe pour la Manufacture des montres ROLEX SA.*

2.2.2 Thèse Hong-Phong Cao

Titre : *Modélisation par éléments discrets rigides et/ou déformables des milieux granulaires et des troisièmes corps solides - Influence du comportement local sur le comportement global*
Thèse INSA-Lyon (Bourse Egide), soutenue le 21 Juin 2011, 183 pages.
Encadrement : M. Renouf (dir.), Yves Berthier (co-dir.)

Résumé - Les Méthodes par Eléments Discrets apparaissent comme les méthodes les

plus appropriées pour modéliser les milieux divisés. De nombreux travaux ont permis de mieux comprendre leurs comportements, mais dans certain cas se pose la question de l'impact du choix de la description volumique ou des lois d'interaction sur le comportement global du milieu. Dans ce contexte, en se basant sur l'approche "Non Smooth Contact Dynamic" permettant naturellement de mixer différentes représentation (rigide et déformable) avec le même formalisme, nous nous proposons de comprendre et d'analyser l'influence de cette description. Pour cela, nous utilisons deux applications différentes liées aux comportement quasi-statique (QS) des milieux granulaires et comportement dynamique des interfaces tribologiques. L'étude QS est faite en utilisant des essais de compression biaxiale et de cisaillement. Contrairement aux approches classiques, des particules déformables sont utilisées ici. Les résultats obtenus sont comparés en utilisant des outils de mesure tels que la relation contrainte-déformation, la compacité... Les résultats montrent qu'il n'est pas possible à partir d'une description rigide de converger vers des modèles déformables et souligne l'importance d'effectuer une analyse complète en tenant compte de la déformation des particules. La modélisation d'une interface tribologique s'intéresse à l'influence des conditions limites (descriptions des premiers corps) sur la rhéologie de l'interface. Dans chaque simulation, frottement macroscopique, profils de vitesse et de contrainte sont observés. Les différents modèles utilisés ont peu d'influence sur la valeur du frottement mais plus d'influence sur les profils de vitesse au travers de l'épaisseur de troisième corps. Ceci souligne l'importante du choix du modèle lors de l'étude de la rhéologie de l'interface et montre qu'il est difficile d'obtenir des résultats génériques et ceci aussi bien en modèles bi que tridimensionnel.

Communications associées : [A7],[A5], [Ci16], [Ci13], [Cn7], [Cn10].

↪ *Après un post-doc au LMT Cachan, Hong-Phong Cao est aujourd'hui ingénieur consultant pour ALTEN SA, rattaché à EDF au Centre National d'Equipement Nucléaire.*

2.2.3 Thèse Coumba Mbodj

Titre : *Rôle des paramètres matériaux et structuraux dans l'homogénéisation numérique des composites C/C. Cas des sollicitations tribologiques de freinage*
Thèse INSA-Lyon (BDI CNRS/Messier-Bugatti), soutenue le 18 Mars 2011, 141 pages.
Encadrement : M. Renouf (dir.), Yves Berthier (co-dir.), Laurent Baillet (co-enc.)

Résumé - Afin de comprendre les mécanismes d'usure et de frottement des composites carbone/carbone (C/C) utilisés en freinage aéronautique, un modèle numérique est utilisé pour dissocier les effets mécaniques des effets physico-chimiques et thermiques. Le modèle repose sur l'utilisation d'une approche par éléments finis et de techniques d'homogénéisation appliquées à un volume élémentaire représentatif (VER) du matériau à l'échelle mésoscopique frottant sur une surface rigide ou déformable. A cette échelle,

le matériau est décrit par une matrice en carbone et des paquets de fibres de carbone appelés torons, perpendiculaires à la surface frottante. Pour assurer la représentativité de la structure du matériau, plusieurs modèles hétérogènes sont étudiés. Les résultats sont comparés à ceux obtenus avec le modèle homogène équivalent qui découle de l'homogénéisation. L'influence des conditions de contact (la rigidité), ainsi que l'influence de la distribution des torons proches de la surface frottante sur les régimes de vibrations des différents modèles sont mises en évidence. L'extension du modèle numérique à un contact entre deux composites a mis en évidence une forte augmentation des contraintes maximales localisées principales dans les torons présents à la surface frottante. Ces fortes localisations de contraintes peuvent avoir pour conséquence l'endommagement des torons ce qui induit la dégradation de la surface frottante jusqu'aux détachements de particules.

Communications associées : [A8], [Ci7], [Ci8], [Ci14], [Ci15], [Cn5], [Cn8].

↪ *Après sa thèse MBD, Coumba Mbodj a fait un post-doctorat pour MBD (cf. Section 2.4.2).*

2.2.4 Thèse Viet-Hung Nhu

Titre : *Dialogues Numériques Entre Echelles Tribologiques*
Thèse INSA-Lyon (Bourse MENRT), soutenue le 14 Juin 2013, 151 pages.
Encadrement : M. Renouf (dir.), Yves Berthier (co-dir.)

Résumé - En tribologie, la modélisation numérique est aujourd'hui un outil indispensable pour étudier un contact afin de pallier les limites expérimentales. Pour comprendre de mieux en mieux les phénomènes mis en jeu, les modèles ne se situent plus à une seule échelle, mais en font intervenir plusieurs, rendant plus que jamais le concept de triplet tribologique incontournable. Travaillant avec cette philosophie et en se basant sur l'approche Non Smooth Contact Dynamics, dont nous rappelons les grandes lignes, nous proposons de franchir deux cas : proposer des modèles offrant des résultats quantitatifs et mettre en place les premières pièces d'une homogénéisation au niveau du contact (VER). Dans le premier cas, l'étude du couplage éléments finis/éléments discrets au sein d'une même simulation a pour but de proposer des modèles plus "réalistes". Même si l'interface utilisée est déjà présente au coeur du contact et ne va pas évoluer, elle permet de mettre en évidence l'utilisation d'outil de mesure permettant de lier le mouvement des particules aux instabilités dynamiques et permet d'avoir des résultats qualitatifs mais aussi quantitatifs puisque la comparaison avec les taux de contraintes expérimentaux sont en très bonne adéquation. Dans le second cas, le VER sous sollicitations tribologiques est étudié afin d'étendre les techniques d'homogénéisation aux problèmes de contact afin de s'affranchir de la description des interfaces aux grandes échelles en trouvant un moyen

d'homogénéiser le comportement hétérogène de l'interface et de le faire dialoguer avec le comportement continu des corps en contact en faisant remonter, dans un sens, des grandeurs moyennées à l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique des premiers corps et dans l'autre sens, se servir des données locales à l'échelle macroscopique comme conditions limites à l'échelle microscopique.

Communications associées : [A3], [A7], [Ci5], [Ci9], [Ci13], [Cn3], [Cn6], [Cn10].

↪ *Après sa thèse MBD, Viet-Hung Nhu a fait un post-doctorat pour MBD dans le cadre de l'ANR FReIN (cf. Section 2.4.3).*

2.2.5 Thèse Matthieu Champagne

Titre : *"Endommagement utile" et "dialogue surface/volume" : Investigations numérique et expérimentale du comportement des composites C/C sous sollicitations tribologiques*
Thèse INSA-Lyon (BDI CNRS/Messier-Bugatti), soutenue le 19 décembre 2013, 153 pages.
Encadrement : M. Renouf (dir.), Yves Berthier (co-dir.)

Résumé - Le matériau composite carbone/carbone ou C/C est utilisé en temps que matériau de friction en freinage aéronautique. Matériau complexe tant du point de vue de sa description microstructurale que de son comportement sous sollicitations tribologiques, il a été l'objet de nombreuses études visant à mieux comprendre les mécanismes régissant sa réponse (frottement, endommagement, usure) à ces sollicitations.
Dans cette étude nous nous focalisons sur l'aspect mécanique de cette réponse. En particulier, nous nous intéressons aux endommagements présents dans le matériau : nous souhaitons étudier tant leurs origines que leur influence sur le comportement du matériau. Pour cela, nous choisissons une approche combinée numérique et expérimentale, nous permettant d'identifier de façon exhaustive ces endommagements puis de construire un modèle numérique tribologique permettant d'étudier les mécanismes d'usure du matériau. Nous montrons comment les mécanismes d'accommodation en volume du premier corps influent sur les détachements de particules en surface, nous conduisant à parler de dialogue tribologique surface/volume.
Le modèle numérique utilise la méthode des éléments discrets pour représenter premier et troisième corps simultanément. Un travail est réalisé autour de la représentativité du modèle vis-à-vis des caractéristiques mécaniques du composite C/C. Nous proposons également une démarche de recherche d'un Volume Elémentaire Représentatif sous condition de contact. Ce modèle ainsi que les observations du matériau nous permettent de proposer un scénario de comportement tribologique du composite C/C, en fonction des sollicitations thermomécaniques qui lui sont appliquées et correspondant aux différents types de freinages aéronautiques. Les endommagements identifiés dans le volume du matériau se révèlent être bénéfiques dans certains cas de figure au travers d'un mécanisme de rigidification du matériau intervenant à haute température, ce qui nous conduit à par-

ler d'*endommagement utile*. Le scénario intègre donc ce phénomène, ainsi que d'autres tant mécaniques que physicochimiques et identifiés par cette étude ou dans la littérature, et montre comment leur équilibre *dynamique* produit le comportement tribologique identifié du matériau pour les différentes gammes de sollicitations qui lui sont appliquées.

Communications associées : [A4], [Ci3], [Ci8], [Cn2].

↪ *Après sa thèse, Matthieu Champagne a été engagé chez MBD en tant qu'Ingénieur Simulation Peformances de freinage dans le Service Performance de freinage WB/T/F, Division Technique Roues & Freins de MBD-Vélizy.*

2.2.6 Thèse Rudy Charlery

Titre : *Comportements sous sollicitations tribologiques d'un matériau énergétique - Recherche des conditions de contrôle de la sécurité de fabrication*
Thèse INSA-Lyon (CIFRE Herakles-SAFRAN), soutenue le 02 Juillet 2014, 208 pages.
Encadrement : A. Saulot (dir.), Yves Berthier (co-dir.), M. Renouf (co-enc.)

Résumé - Les matériaux énergétiques sont, par définition, des matériaux susceptibles de dégager un volume important de gaz, en se décomposant via les phénomènes suivants : combustion, déflagration ou détonation. Ils sont notamment utilisés dans les secteurs industriels de l'automobile (déploiement d'airbag), du militaire (propulsion de missiles tactiques et stratégiques, munitions) et du spatial (boosters de lanceurs spatiaux type Ariane 5). La maîtrise de leur fabrication nécessite que soient vérifiées certaines contraintes spécifiques rencontrées lors de leur mise en oeuvre dans un malaxeur bivis. En effet, ce procédé de malaxage en continu induit de fortes évolutions de gradients de pression et de cisaillement au sein du matériau énergétique (entrefers réduits...) qui peuvent initier les constituants fluides et solides. Par conséquent, dans un souci de parfaite maîtrise des risques industriels, les conditions tribologiques menant à l'initiation d'un matériau énergétique, ici le propergol, lors de sa fabrication, doivent être étudiées. Malheureusement, à cause de la confidentialité industrielle liée à ce secteur d'activité, la bibliographie de la tribologie des propergols est limitée. Il apparait toutefois que peu d'études portent effectivement sur le comportement tribologique du troisième corps, c'est à dire le propergol. Ce dernier étant hétérogène (mélange de constituants fluides et de solides), il est donc nécessaire d'appréhender les écoulements internes qui l'animent sous sollicitations tribologiques. Ainsi, pour reproduire les sollicitations mécaniques élémentaires (compression et cisaillement) appliquées par les deux premiers corps que sont les vis et le fourreau, et subies par le troisième corps lors du malaxage, il a été choisi d'utiliser une approche couplée expérimentale et numérique. Cette dernière s'organise autour de l'instrumentation d'un dispositif de sécurité permettant la sollicitation par frottement du propergol et de la modélisation par éléments discrets du triplet tribologique (parois supérieure et inférieure des premiers corps, et troisième corps).

Il est ainsi apparu un comportement tribologique caractéristique du troisième corps : des ségrégations entre les constituants mènent à un arrangement selon trois couches superposées dans l'épaisseur du troisième corps. Ces ségrégations sont issues de la mise en place de débits internes, spécifiques à chaque nature et géométrie de constituants. Ces débits sélectionnent les constituants présents dans l'aire de contact et favorisent l'existence de conditions tribologiques favorables à l'initiation du troisième corps (assèchement de l'épaisseur, localisation des efforts appliqués au troisième corps ...). L'ensemble de ces débits permet de reconstituer un circuit tribologique d'initiation d'un propergol et ainsi d'envisager des solutions techniques permettant d'endiguer la mise en place des conditions défavorables à la fabrication en sécurité d'un propergol dans un malaxeur bivis.

Communications associées : [A2].

↪ *Après sa thèse, Rudy Charley a été engagé dans le group Swatch (Suisse) comme responsable de projet dans le département de tribologie.*

2.3 Thèses en cours

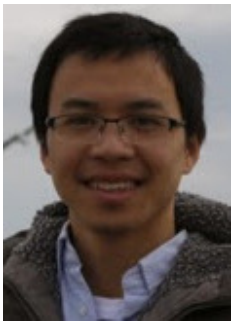
2.3.1 Thèse Jérôme Rivière

Titre : *Modélisation thermomécanique et tribologique des performances et de l'usure en freinage aéronautique* Thèse INSA-Lyon (CIFRE MBD), fin prévu juin 2015.
Encadrement : M. Renouf (dir.), Yves Berthier (co-dir.)

Résumé - Dans le cadre de la modélisation numérique du freinage, MBD développe depuis 2004 un code de calcul permettant une simulation rapide des performances de freinage. Ce code de calcul permet de simuler l'ensemble des phénomènes thermomécaniques ayant lieu au cours du freinage. Les simulations numériques donnent aujourd'hui des prévisions de performance relativement fiables, mais ne permettent pas de simuler correctement les phénomènes d'usure. Ces derniers sont issus de données expérimentales et ne s'adaptent pas nécessairement aux conditions locales issues du modèle (comportement local différent), empêchant celui-ci d'être prédictif. Aujourd'hui avant de poursuivre les modélisations, il semble nécessaire de prendre du recul par rapport aux différents développements dans le domaine et faire un état de l'art sur la modélisation thermomécanique des composites et bien identifier les points et faiblesses des codes de calcul utilisés dans le domaine.

Communications associées : [Ci1], [Cn1].

2.3.2 Thèse Chaoqun Zeng



Titre : *Etude du fonctionnement tribologique des balais de démarreur électrique pour répondre aux exigences de la fonction "Start & Stop" des automobiles*
Thèse UM2 en co-tutelle avec INSA-Lyon (CIFRE Valéo), fin prévu septembre 2016.
Encadrement : M. Renouf (dir.), Yves Berthier (co-dir.)

Résumé - L'usure des balais frottant sur le collecteur à lames d'un démarreur électrique est critique car elle en impacte directement la fiabilité et la durée de vie. Les contacts balais / collecteur sont sollicités de façon brève dans des conditions électriques et mécaniques très sévères, qui se trouvent amplifiées par les exigences actuelles du marché automobile et de ses accessoires. Les exigences inhérentes à la fonction Start & Stop exigent de multiplier la durée de vie de ces contacts par 5 tout en restant fiable.
Actuellement la conception des contacts balais / collecteurs est très empirique tant du point de vue du design que du choix des matériaux. En effet, l'approche actuelle vise à adapter la composition des matériaux suite à des expérimentations sur banc d'essais en laboratoire.
Par expérience, il est connu que la durée de vie de ces contacts est limitée par des interactions mécaniques et électriques qui se produisent "dans le contact" entre les corps frottants qui sont à base de cuivre et de graphite. Ces interactions sont encore peu connues. Pour mieux les cibler, un macro modèle d'usure est en cours d'élaboration chez Valeo. Il associe des paramètres externes au contact balai - collecteur (effort d'appui du ressort, vitesse, courant, température, inductance) et les coefficients d'usure K caractéristiques des balais.
Dans ce contexte la finalité du travail est de comprendre comment se produit l'accommodation de vitesse entre balais et collecteur afin de contrôler le passage du courant et l'usure. L'instrumentation in situ d'un contact étant délicate, il faut en en reconstituer la vie tribologique à partir de simulations expérimentales (bancs d'essais, caméra rapide, microscopie électronique...) et numériques (éléments discrets).

2.3.3 Thèse Komla Apélété Kounoudji

Titre : *Simulation tribologique physique et numérique des assemblages boulonnés des structures et moteurs d'aéronefs*
Thèse INSA-Lyon) (FUI CARAB), fin prévu septembre 2016.
Encadrement : Yves Berthier (dir.), Guilhem Molhon (co-dir.), Mathieu Renouf (co-enc.)

Résumé - Les liaisons boulonnées sont utilisées lorsqu'il y a des impératifs de maintenance et de démontage ou lorsque les solutions de collage ou de soudage s'avèrent

impossibles à mettre en oeuvre. En aéronautique, ces liaisons se retrouvent dans la structure primaire des aéronefs et dans les moteurs (3 000 000 sur un A380, 50 000 sur un Rafale, 3 500 sur un moteur CFM56).
A priori bien maîtrisée, cette méthode de liaison par serrage est la source d'incertitudes et de difficultés tout au long de la vie des produits aéronautiques, de leur conception jusqu'à leur exploitation (desserrage, usure, rupture, etc.). Ces incertitudes proviennent de la forte sensibilité aux dispersions telles que le frottement, les tolérances géométriques, les procédures de serrage etc... soit plus généralement leur état tribologique. De plus les méthodes actuelles de conception sont empiriques et datent des années 70-80 alors que les systèmes conçus s'éloignent de plus en plus des hypothèses de ces méthodes. Pour rétablir la situation, le groupe Safran et Liebherr Aerospace lancent une action d'envergure devant déboucher sur la conception virtuelle d'un assemblage boulonné.
Dans cette logique, l'objectif de cette thèse est d'identifier, pour les analyser, les conditions tribologiques réelles locales pour ensuite les introduire dans le modèle de conception virtuelle. Comme un contact tribologique est un milieu confiné, il faut en reconstituer le fonctionnement à la fois par des simulations physiques et des simulations numériques. Les simulations physiques seront à définir pour qu'elles soient représentatives et facilement expertisables. Plusieurs itérations entre ces simulations seront nécessaires pour converger vers un scenario de fonctionnement tribologique des différents contacts d'un assemblage boulonné. Dans un deuxième temps, les simulations numériques tribologiques, qui nécessitent des temps de calculs longs, seront utilisées pour préparer des modèles qui seront la base de futures simulations ayant des temps de calculs acceptables industriellement.

2.3.4 Thèse Maria Daniela Villavicencio-Rojas

Titre : *Modélisation prédictive du comportement tribologique des matériaux composites autolubrifiants*
Thèse INSA-Lyon (CIFRE CNES-SKF), fin prévu septembre 2017.
Encadrement : Aurélien Saulot (dir.), Mathieu Renouf (co-dir.)

Résumé - Cette thèse concerne la recherche de solutions de lubrification sèche pour des roulements à grandes durées de vie dont les domaines d'application sont les mécanismes pour mission conjuguant un environnement thermique sévère et une grande durée de vie et/ou les mécanismes d'instruments optiques pour lesquels les condensas de dégazage rendent l'utilisation d'une lubrification fluide délicate.
Pour ces applications, les solutions de lubrification consistent généralement à utiliser la cage des roulements à billes comme réservoir de lubrifiant sec. Les performances de l'autolubrification dépendent alors fortement du matériau utilisé pour les cages mais aussi des conditions de contact au sein du roulement (phénomène de double transfert). Suite à l'obsolescence du matériau utilisé par le passé, des actions R&T ont été démarrées par le CNES et l'ESA auprès des laboratoires européens de tribologie. Jusqu'à présent ces actions ont principalement consisté à tester des matériaux du commerce souvent sélectionnés arbitrairement.

A ce jour aucune solution satisfaisante n'a été trouvée en raison du manque de compréhension du phénomène de transfert du lubrifiant de la cage au contact bille/piste et de la lourdeur des essais à mettre en œuvre pour qualifier un nouveau matériau (essais élémentaires puis essais composants sur une multitude de matériaux candidats). Face à ce constat, les progrès récents réalisés en tribologie numérique offrent une flexibilité permettant d'espérer accompagner et guider la conception/fabrication de nouveaux matériaux autolubrifiants. La présente thèse se situe dans la continuité des actions R&T CNES sur la caractérisation expérimentale de matériaux autolubrifiants. Ces actions ont/vont en effet fourni(r) des données expérimentales qui serviront à l'élaboration et au recalage des modèles numériques.
L'objectif principal de la thèse est donc de palier au manque de compréhension du phénomène d'autolubrification et de transfert dans les roulements mais aussi de mettre en œuvre une modélisation prédictive du comportement tribologique des matériaux composites autolubrifiants en s'appuyant sur l'exemple du Duroïd car la démarche inverse qui consisterait à concevoir intégralement un matériau n'est encore pas possible.

2.4 Post-doctorants encadrés

2.4.1 Post-doc Pierre Bernard

Titre : *Modélisation discrète des tissus de frottement sous sollicitations tribologiques*
Financement projet TEXTILUB (2009-2011).

Résumé - Ce post-doctorat s'est fait dans le cadre du projet TEXTILUB. Les tissus de frottement, matériaux au coeur du projet, sont employés pour préserver l'usure des rotules d'articulations de pales d'hélicoptères. Dans ses travaux, Pierre Bernard a utilisé les approches par éléments discrets pour représenter le tissus et pouvoir modéliser son usure, les fils du tissus étant représentés comme des chapelets de billes, reliées par des liaisons bilatérales. Le post-doc a duré 24 mois (début nov. 2009) et a consisté tout d'abord à élaborer un outil de pré-processing dédié à l'application visée et à réaliser ensuite une campagne d'essais numériques afin d'identifier les paramètres mécaniques du matériau (type de tissage, imprégnation de la résine) influant le comportement tribologique. Ce travail s'est fait en collaboration avec deux ingénieurs de recherche s'occupant des caractérisations expérimentales et des des essais tribologiques sur les tissus, afin de fournir au modèle des paramètres représentatifs.

Avec Pierre Bernard, nous avons développé un logiciel de pré-processing pour mettre en place des structures tissées en utilisant les approches discrètes. Ce développement à donné lieu à une cessation de licence pour le partenaire industriel SKF.

Communications associées : [Cn4].

↪ *Pierre Bernard est aujourd'hui Ingénieur R&D Matériaux & Procédés pour la SNECMA*

2.4.2 Post-doc Coumba Mbodj

Titre : *«Modélisation thermomécanique des performances et de l'usure en freinage»*
Financement MBD (2011-2012).

Résumé - Dans le cadre de la modélisation numérique du freinage, MBD développe depuis 2004 un code de calcul permettant une simulation rapide des performances de freinage. Ce code de calcul permet de simuler l'ensemble des phénomènes thermomécaniques et tribologiques ayant lieu au cours du freinage. Les simulations numériques donnent aujourd'hui des prévisions de performance relativement fiables, mais ne permettent pas de simuler correctement les phénomènes d'usure. Ces derniers sont issus de données expérimentales et ne s'adaptent pas nécessairement aux conditions locales issues du modèle (comportement local différent), empêchant celui-ci d'être prédictif.

Durant ce post-doc, un état de l'art de la modélisation thermomécanique des composites a été dressé en identifiant les points et faiblesses des codes de calcul utilisés dans le domaine. Une bibliographie des travaux traitant de la modélisation thermomécanique des composites a également été réalisée. Les formulations, algorithmes et codes de calcul ont été listés.

Une analyse tribologique du code Thermomécanique développé par MBD a ensuite été effectuée, en pointant les faiblesses du code MBD sur les aspects tribologiques (le code étant pour les autres aspects robuste et pertinant). Les résultats ont ainsi servi comme cahier des charges dans le développement d'un logiciel dédié à la simulation des performances de freinage.

↪ *Coumba Mbodj est, depuis décembre 2012, devenue ingénieur consultant pour le groupe MATIS.*

2.4.3 Post-doc Viet-Hung Nhu

Titre : *«Modélisation de la fragmentation et de la composante adhésive des composites Carbone/Carbone»*
Financement ANR (2012-2013).

Résumé - Ce post-doctorat est en relation avec l'ANR FReIN et la partie modélisation. Le but ici est de modéliser le comportement du matériau C/C dans la gamme de sollicitations données par le broyeur utilisé pour faire une analogie avec le freinage.

Cette modélisation a été réalisée par éléments discrets, seule approche à même de prendre en compte les multiples discontinuités de la matière, sa fragmentation et sa ré-agglomération.

Concernant la fragmentation des particules, différentes géométries et lois d'interaction ont été utilisées afin d'évaluer leur influence sur la fragmentation des particules lors de tests élémentaires. La modélisation a été ensuite étendue à une collection de particules pouvant être endommagées lors d'un essais de cisaillement.

Concernant la ré-agglomération, un modèle de cohésion intégrant la composante chimique (nombre de sites actifs) a été développé. Ce développement s'est fait via des

échanges avec les chimistes de l'IS2M. Des allers-retours ont été nécessaires entre observations/caractérisations et modélisation afin d'affiner et caler le modèle.

↪ *Après son post-doc avec MBD, Viet-Hung Nhu est ingénieur consultant pour VibraTeam depuis mars 2013, actuellement en mission pour la SNCF (Paris).*

2.4.4 Post-doc Paul Tafforel

Titre : *«Couplage Discret/Continu - Application à la problématique ferrovaire»*
Financement SNCF (2012-2013).

Résumé - Durant ce travail de post-doctorat Paul a développé une méthodologie de couplage entre éléments discrets (DEM) et éléments finis (FEM) dans le contexte du ferroviaire afin de mieux comprendre le fonctionnement d'une structure de voie ferrée. Le département Innovation & Recherche (I&R) de la SNCF utilise depuis une dizaine d'années la méthode Non-Smooth Contact Dynamics (NSCD) implémentée dans le code de calcul LMGC90 pour modéliser le ballast et les structures de voie ; l'approche de modélisation suivie consistant à considérer l'ensemble des éléments de la structure de voie comme des corps rigides. En s'appuyant sur l'expérience acquise durant ces années, une approche moins « grossière » a été proposée permettant de prendre en compte la déformabilité du sol, constituant important de la voie. Dans un premier temps, une méthodologie dédiée à ce type de modélisation FEM/DEM a été mise en place et validée sur des cas d'études simples. Dans un second temps, ce type d'approche est appliquée à des problématiques spécifiques rencontrées dans le domaine ferroviaire.

↪ *Après son post-doc, Paul Tafforel s'est lancé dans le démarrage d'une Start-Up..*

CHAPITRE 3

Partenariats académiques et industriels

Le travail collaboratif joue une part importante dans le développement de la recherche. Il permet l'échange et la confrontation d'idée, et aide également à faire murir sa propre façon de pensée. Depuis ma prise de fonction, j'ai eu la chance d'échanger avec différents acteurs académiques et industriels provenant de domaines divers et variés. Certains échanges se sont réalisé sans cadre formel, d'autre ont pu bénéficier de financement (nationaux ou privés). Ils sont tous synthétisés dans les sections qui suivent.

3.1 Collaboration avec des partenaires académiques

3.1.1 Hors cadre

Après ma prise de fonction à l'INSA-Lyon, j'ai continué a travailler avec Vincent Acary (CR INRIA, projet BIPOP, INRIA Rhône-Alpes) sur la comparaison de méthodes numériques pour la simulation de systèmes multi-corps. Les aspects robustesse et rapiditié des algorithmes ont été mis en avant lors ce de travail qui a donné lieu à une communication lors de la conférence ECCOMAS se déroulant à Lisbonne [Ci20]. Ces travaux ont permis d'avoir une vision plus claire sur l'efficacité de différents algorithme de résolution pour la résolution des problèmes de contact frottant.

J'ai réalisé avec Daniel Bonamy (CR CEA, DRECAM, CEA Saclay, Gif Sur Yvette), un travail sur la rhéologie des écoulements de surface par approche granulaire (numérique et expérimentale). Ceci m'a d'ailleurs permis d'exposer mes travaux lors d'un séminaire à Orsay en Janvier 2006 intitulé : "Non Smooth Contact Dynamics. Des problèmes géophysiques aux simulations temps-réel". Nos travaux ont abouti en 2005 à une publication [A16] focalisant sur les caractères globaux des écoulements. Nos recherches se sont ensuites tournées vers des aspects locaux [A10]. Cette collaboration s'est enrichie avec la participation de Bérengère Dubrulle et François Daviaud, également au CEA (department SPEC) et un travail sur l'adaptation de modèles issus de la théorie des turbulences à la description des écoulements granulaires. Ce travail a également donné lieu à une publication [A9].

A mon arrivée au LMGC, une collaboration a été menée avec le LGC (UMR 5503) à Toulouse en les personnes de Micheline Abbas et Florent Bourgeois. Ce travail s'est porté

sur la comparaison de résultats numériques et expérimentaux de la fragmentation de billes de pyrex. L'étude expérimentale a été menée au LGC et les simulations numériques ont été conduites au LMGC par Belien Gezahegn lors d'un stage de Master 1. Cette étude préliminaire s'est basée sur une représentation discrète de la bille de pyrex pour laquelle ont été testés l'influence de la loi d'interaction entre éléments (loi cohésive réversible ou irréversible) et la géométrie des éléments de base (circulaires ou polygonales). L'influence de la loi de comportement (rigide ou déformable) n'a pu être étudiée faute de temps mais reste l'une des perspectives majeures du travail. Ce travail a donné lieu à une communication dans une conférence internationale avec comité de lecture [C4].

3.1.2 Plate-forme LMGC90

Je participe depuis ma thèse au développement de la plate-forme LMGC90, plate-forme Open-Source (Licence CeCiLL [1]), dédiée à la modélisation des problèmes d'interactions. Ce travail se fait en collaboration avec Frédéric Dubois (Lauréat 2007 au Cristal CNRS), ingénieur de recherche CNRS (LMGC-UMR5508) et depuis 2012 avec Rémy Mozul (IR CNRS) recruté au LMGC. Je m'occupe plus particulièrement de l'intégration des modèles multi-physiques, des lois de contacts et des algorithmes de résolution dans la plate-forme.

Dans ce cadre de développement, je participe également à l'organisation de formations et de journées utilisateurs mise en place depuis 2006 (formation sur 5 jours) et j'interviens régulièrement lors de session logiciel au colloque CSMA (Giens, France).

3.1.3 GiS InTriG

Suite à mon départ du LaMCoS en 2011, et celui également de Francesco Massi en 2012 de l'équipe TMI pour l'Université "La Sapienza", nous avons décidé avec Yves Berthier et Aurélien Saulot de mettre en place un GIS (Groupe d'Intérêt Scientifique) baptisé "InTriG" pour International Tribology Group. Ce GIS se justifie scientifiquement et techniquement, par les difficultés actuelles rencontrées pour résoudre les problèmes de frottement, d'usure et de lubrification solide mais également structurellement, par la nécessité de regrouper des compétences spécifiques qui ont été dispersées par des promotions assorties de mutations géographiques.

L'objectif scientifique a atteindre au travers du GIS est la conceptualisation des solutions des différents problèmes de frottement, pour créer un modèle prédictif du frottement et de l'usure valable dans tous les domaines y compris celui du vivant.

3.2 Participations à des projets de recherche

Depuis mon recrutement au CNRS, je participe activement à de nombreux projets de recherche, allant des projets ANR à des projets commandées directement par des

1. http ://www.cecill.info

industriels. L'ensemble de ces actions est présenté de manière synthétique dans cette section, en précisant les différents acteurs impliqués dans le projet.

3.2.1 LubFundaments

De 2006 à 2007, j'ai fait parti du programme européen LubFundaments, projet d'échange entre l'INSA de Lyon et SKF-ERC [2]. Durant la première année du programme, j'ai eu le rôle d'*experienced researcher* et j'ai passé environ 6 semaines chez ERC (Nieuwegein, Pays-Bas) pour pouvoir effectuer une analyse des compétences du groupe dans le domaine de la modélisation numérique et ainsi voir quelles actions pouvaient être menées conjointement. A la suite de cette première année, j'ai été responsable d'un projet pilote concernant la modélisation des contaminants dans un lubrifiant.

Il s'agit de coupler méthode analytique et/ou calcul de fluide avec approches discrètes pour connaitre l'impact des contaminant sur la durée de vie des roulements. J'ai travaillé sur ce sujet en partenariat avec Guillermo Morales (senior scientist, SKF-ERC). Ce travail s'est fait essentiellement durant des séjours aux Pays-Bas (séjours de 15 jours une à deux fois par an), mais aussi au travers d'un projet d'ingénierie effectué par Julien Meunier, étudiant de 4e année GMD.

3.2.2 Grease Flow modelling

En 2007, j'ai été responsable d'un projet mené avec SKF-ERC (Nieuwegein, Pays-Pas) et SKF-MDC (Gotheborg, Suède) en collaboration avec Piet Lugt (*Scientist/Expert in Lubrication & Tribology/Maintenance*, SKF-ERC), Rihard Pasaribu (*Team Leader Wells R&D at Shell Projects & Technology*, SKF-ERC), Mikael Holgerson (*Manager Test Centre Göteborg*, SKF-MDC) et Dag Fritzon (*Senior Scientist*, SKF-MDC).

L'objectif de ce projet était de retrouver le comportement global des graisses en utilisant des milieux discrets pour pouvoir étudier leur migration dans des roulements. L'intérêt de cette approche est d'utiliser un outil robuste permettant de prendre en compte leur discontinuité impossible à prendre avec des approches continues. Ce projet s'est déroulé sur 18 mois et a donné lieu à un rapport de recherche [R1].

3.2.3 Shuntage

Dans le cadre d'un projet piloté par la SNCF (responsable : Philippe Demanche, Chef de projet en Recherche & Innovation), j'ai travaillé sur une modélisation mécano-électrique du contact roue-rail. Les différents acteurs était l'INRETS (nouvellement IFSTTAR) et le LPM. L'objectif était de prendre en compte les phénomènes électriques dans les modèles par éléments discrets pour comprendre le comportement tantôt isolant tantôt conducteur de l'interface de contact entre une roue et un rail. Ce comportement pouvant avoir de lourde conséquence sur la circulation des trains : le train pouvant devenir "invisible" pour la gestion des passages à niveau. J'ai pu ainsi mettre en place un modèle multi-physique validé en reproduisant le comportement électrique et statique

2. SKF est le leader mondial dans la technologie des roulements, présent dans plus de 130 pays et impliquant plus de 45 000 personnes

des poudres métalliques et ainsi étendre la méthode au comportement dynamique des interfaces tribologiques.

Ce projet a donné suite à un rapport de recherche [R2], une communication dans une conférence internationale [Ci25] et deux articles [A11,A12].

3.2.4 Usure Ballast

J'ai été responsable au cours de l'année 2007 d'un projet concernant l'usure des grains de ballast, étude commandée par la SNCF (resp. Gilles Saussine). Le but de l'étude était d'effectuer une série d'essais sur des grains de ballast sous sollicitations de fretting (petits mouvements periodiques) et d'écrire, si possible, une loi de frottement prenant en compte l'usure de grains au cours des essais de façon indirecte. Le contact entre grains de ballast a été réalisé grâce à des épontes (demi-grain collé sur un socle métallique) disposées dans un dispositif expérimental contrôlant la force normale appliquée et les déplacements tangentiels.

Cette étude expérimentale nous à permis de mettre en valeur une reproductibilité des essais et également d'identifier le type de loi représentant le contact entre grains dans un échantillon de ballast, loi de contact frottant proche de la loi de Coulomb-Orowan plutôt que de la loi de Coulomb utilisée classiquement.

Ce projet a donné suite à un rapport de recherche [R3].

3.2.5 TEXTILUB

De janvier 2009 à décembre 2011, j'ai été superviseur de la partie modélisation numérique sur le projet Textilub, projet de R&D collaboratif, dédié à l'usure des tissus de frottement dans les rotules d'hélicoptères. Ce projet impliquait trois industriels (SKF, SCHAPPE TECHNIQUES et INS) et de deux laboratoires de recherche publics (LaMCoS et MATEIS), répartis dans 4 départements de la région Rhône-Alpes.

Le but de la modélisation est d'utiliser les approches par éléments discrets pour représenter le tissus et pouvoir modéliser son usure. Le travail de modélisation est effectué par Pierre Bernard, post-doctorant.

3.2.6 ANR DiNEET

De janvier 2009 à décembre 2011, j'ai été porteur d'une l'ANR Jeunes Chercheurs intitulée "DiNEET", acronyme pour Dialogue Numérique Entre Echelles Tribologiques. Dans ce projet j'ai mis en place un cadre de travail permettant à quatre jeunes chercheurs de l'équipe TMI (Aurélien Saulot, Francesco Massi et Nicolas Fillot) de travailler ensemble. Le but de l'ANR était à la fois de développer un dispositif tribologique modèle capable d'être simulé à différentes échelles et de mettre en place des méthodes numériques multi-échelles donnant des résultats qualitatifs. Dans le projet les échelles macro, micro et nanométriques ont été étudiés. Ce projet a donné lieu à de nombreuses publications [A1,A3,A6] et communications [Ci2,Ci3,Ci6] et a été classé fait marquant par l'ANR en 2011.

3.2.7 ANR FReIN

Le projet ANR FReIN, acronyme pour Frottement Réactif et Instrumentation Numérique, projet de 42 mois s'est étalé de janvier 2011 à août 2014. Il réunissait MBD, l'IS2M, le LaMCoS, et indirectement le LMGC suite à mon changement d'affectation. L'objectif de ce projet est d'utiliser le broyage sous conditions mécaniques et chimiques contrôlées comme un problème modèle afin de découpler et de comprendre l'enchaînement des actions mécano-chimiques responsables du frottement et de l'usure des composites C/C. Pour cela le comportement de la matière lors du broyage a été simulé par éléments discrets. Cette simulation a permis de prendre en compte les aspects mécanique, thermique et chimique, et ainsi servir d'instrumentation numérique afin d'assurer la transition entre les phénomènes locaux (adhésion, frottement inter-particule...) et les mesures globales effectuées à l'échelle du broyeur instrumenté.

Durant le projet, j'ai été responsable de la partie modélisation, assurant le suivi de la thèse de M. Champagne (cf. Section 2.2.5), du post-doctorat de Viet-Hung Nhu (cf. Section 2.4.3) et du développement et la réalisation d'une partie des tâches.

Ce projet a donné suite, pour l'instant, à une publication [A4].

3.2.8 FUI CARAB

Ce projet a pour objectif de développer des méthodes de Conception Avancée Robuste pour les Assemblages Boulonnés (CARAB) utilisés dans les domaines aéronautique et spatial. Il est porté par la SNECMA et est né du constat que la technique des assemblages boulonnés est loin d'être parfaitement maîtrisée par les industriels (même si on trouve plus de quarante mille boulons sur un Airbus). Or les centres de recherche et certaines PME ont des compétences qui peuvent être réunies pour proposer de nouvelles méthodes de conception : compétences des laboratoires qui disposent des méthodes numériques avancées pour la résolution des modèles multi-contacts et frottements, des éditeurs de logiciels qui peuvent introduire les méthodes numériques des laboratoires dans les codes utilisés par les industriels et des sociétés spécialisées dans les méthodes de " virtual testing ", d'optimisation, de robustesse ou d'IHM de dernière génération. Le projet est estimé à 36 mois et fait intervenir un grand nombre de partenaires industriels (Lisi Aerospace, MBD, Turbomeca, Liebherr Aerospace Toulouse SAS, Alyotech, CADLM, Mecano ID, Samtech et Structure Computation) et académiques (CETIM, Institut Clément Ader, LAMCOS, LMT ENS Cachan). J'interviens essentiellement dans la partie tribologie numérique dont est en charge initialement le LaMCoS au travers de la thèse de Komla Apételé Kounoudji (cf. Section 2.3.3)

3.2.9 ANR MoNumENTUM

Le projet oeuvre pour la modélisation numérique et la gestion de données pour la conservation des structures maçonnées. Il regroupe les laboratoires MAP, LMGC, le CICRP, le CRMD, l'ENSG et la DRAC pour une durée de 36 mois. Dans le domaine du patrimoine construit, des données variées décrivent les états du monument (données de relevé et d'imagerie scientifique, cartographies des détériorations, collectes photographiques, archives historiques, documents d'analyse, carottages, etc.). Face à la diffi-

culté de collecter, comparer, analyser et valider les données préalables à la restauration, ce projet vise à mobiliser divers champs disciplinaires (l'architecture, la conservation, la mécanique, l'informatique) afin de définir un prototype de chaîne de traitement de l'information (incluant données métriques et spatiales, analyses des surfaces, modèles géométriques des structures, sources documentaires hétérogènes, etc.). L'objectif est de concevoir et de développer une plateforme logicielle ouverte et extensible pour la capitalisation et la gestion de connaissances favorisant la compréhension et l'analyse des phénomènes de dégradation qui affectent les édifices historiques.

J'interviens essentiellement dans la partie modélisation des structures maçonnées et la modélisation du comportement multi-physique des pierres, comme par exemple la diffusion de l'eau et son impact sur la tenue mécanique.

CHAPITRE 4

Productions scientifiques

Revues à comité de lecture (20)

[A1] J. Brunetti, F. Massi, A. Saulot, M. Renouf, W. D'Ambrogio. System dynamic instabilities induced by sliding contact : a numerical analysis with experimental validation, to appear in Mech. Sys. Sign. Process. (2014).

[A2] R. Charlery, M. Renouf, A. Saulot, N. Daly, Y. Berthier. Experimental and numerical modelling of the ignition of solid propellant, Tribol. Int. (2014) in Press.

[A3] M. Renouf, V.-H. Nhu, A. Saulot, F. Massi. First-Body Versus Third-Body : Dialogue between an Experiment and a Combined Discrete and Finite Element Approach, ASME J. Tribol. (2014) 136(2) :021104.

[A4] M. Champagne, M. Renouf, Y. Berthier. Modeling wear for heterogeneous bi-phasic materials using discrete elements approach, ASME J. Tribol. (2014) 136(2) :021603

[A5] H.-P. Cao, M. Renouf, F. Dubois, and Y. Berthier. Coupling Continuous and Discontinuous Descriptions to Model First Body Deformation in Third Body Flows. ASME J. Tribol. (2011) 133(4) :041601.

[A6] M. Renouf, F. Massi, N. Fillot, A. Saulot. Numerical tribology of dry contact, Tribol. Int. (2011) 44(7-8) :834-844.

[A7] M.Renouf, H.-P. Cao, V.-H. Nhu. Multiphysical modeling of third-body rheology, Tribol. Int. (2011) 44(4) :417-425.

[A8] C. Mbodj, M. Renouf, G.Peillex, L. Baillet, Y. Berthier. Influence du "contraste" des propriété élastiques des composites carbone/carbone (C/C) sous conditions dynamiques de contact frottant, Mec. Ind. (2010) 11(3-4) :289-294.

[A9] P.-P. Cortet, D. Bonamy, F. Daviaud, O. Dauchot, B. Dubrulle and M. Renouf. Relevance of visco-plastic theory in a multi-directional inhomogeneous granular flow, EPL (2009) 88 :14001.

[A10] D. Bonamy, P.-H Chavanis, P.-P. Cortet, F. Daviaud, B. Dubrulle, M. Renouf. Euler-like modelling of dense granular flows : application to a rotating drum, Euro. Phys. J. B (2009) 68(4) :619-627.

[A11] M. Renouf and N. Fillot, Coupling electrical and mechanical effects in discrete element simulations, Int. J. Num. Methods Engrg (2008) 74(2) :238-254.

[A12] S. Descartes, M. Renouf, N. Fillot, Y. Berthier and P. Demanche, A new mechanical-electrical approach to the wheel-rail contact, Wear (2008) 265(9-10) :1408-1416.

[A13] D. Richard, I. Iordanoff, M. Renouf and Y. Berthier, Thermal study of the dry sliding contact with third body presence, ASME J. Tribol. (2008), Vol. 130(3) :031404.

[A14] D. Richard, I. Iordanoff, M. Renouf, Y. Berthier and N. Fillot, Friction coefficient as a macroscopic view of local dissipation, ASME J. Tribol. (2007) 129(4) :829-835.

[A15] M. Renouf, F. Dubois and P. Alart, Numerical investigations of fault propagation and forced fold using a non smooth discrete element method, Rev. Eur. Method. Num. (2006) 15 :549-570.

[A16] M. Renouf, D. Bonamy, F. Dubois and P. Alart, Numerical simulation of two-dimensional steady granular flows in rotating drum : On surface flow rheology, Physics of Fluids (2005) 17(10) :103303.

[A17] M. Renouf and P. Alart, Conjugate gradient type algorithms for frictional multi-contact problems : applications to granular materials, Comp. Methods Appl. Mech. Engng. (2005) 194(18-20), pp. 2019-2041.

[A18] M. Renouf et P. Alart, Solveurs parallèles pour la simulation de systèmes multicontacts, Rev. Eur. Elem. Finis (2004) vol. 13, pp 691-702.

[A19] M. Renouf, F. Dubois and P. Alart, A parallel version of the non smooth contact dynamics algorithm applied to the simulation of granular media, Journal of Computational and Applied Mathematics (2004) Vol. 168(1-2), pp. 375-382.

[A20] P. Alart, M. Barboteu, and M. Renouf, Parallel computational strategies for Multi-contact problems : Applications to cellular and granular media, Int. J. Mult. Scales Comput. Engrg. (2003) vol. 1(4), pp 419-430.

Chapitres de livres (2)

[B1] M. Renouf, Y. Berthier. Numerical Modeling of Heat Production and Transmission, in Discrete-element Modeling of Granular Materials, F. Radjai et F. Dubois eds., Wiley, 2011.

[B2] M. Renouf, Y. Berthier. Modélisation numérique de la génération et de la transmission de chaleur, dans Modélisation numérique discrète des matériaux granulaires, F. Radjai et F. Dubois eds., Hermès.

Actes de Conférences Internationales (30)

[Ci1] J. Riviere, M. Renouf, Y. Berthier. Thermal transfer modelling by discrete element method - Towards a better understanding of heat generation and transfer in dry tribology, Proceedings of WTC 2013, 5th World Tribological Congress, Turin, Italia, 8-13 September 2013.

[Ci2] A. Saulot, F. Massi, M. Renouf, Y. Berthier, Competition between 3rd Body Flows and Local Contact Dynamics, Proceedings of WTC 2013, 5th World Tribological Congress, Turin, Italia, 8-13 September 2013.

[Ci3] M. Champagne, M. Renouf, Y. Berthier. Discrete Elements Models of Heterogeneous Friction Material : a Numerical Study of Wear, Proceedings of WTC 2013, 5th World Tribological Congress, Turin, Italia, 8-13 Septembre 2013.

[Ci4] M. Renouf, B. Gezahengn, M. Abbas, F. Bourgeois. Impact of Numerical Models on Fragmentation Processes. PG2013 - Proceedings of the 7th international conference on Micromechanics of Granular Media, Sidney, Australia, 8-12 July 2013.

[Ci5] V.-H. Nhu, M. Renouf, F. Massi, A. Saulot. Wear Particles : Influence on Local Stress and Dynamical Instabilities. PG2013 - Proceedings of the 7th international conference on Micromechanics of Granular Media, Sidney, Australia, 8-12 July 2013.

[Ci6] F. Massi, A. Saulot, M. Renouf, G. Messager. Simulation of Dynamic Instabilities Induced by Sliding Contacts. DINAME 2013 - Proceedings of the XV International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics M.A. Savi (Editor), ABCM, Buzios, RJ, Brazil, 17-22 Febuary 2013.

[Ci7] C. Mbodj, M. Renouf, Y. Berthier. Advances in the modelling of carbon/carbon composite under tribological constraints. Eurobrake colloquium, Dresden, Germany, 16-19 Avril 2012.

[Ci8] M. Champagne, M. Renouf, C. Mbodj, Y. Berthier. A Multiscale Approach for Damage of Biphasic Composite Under Tribological Solicitations. IJTC2011 - Proceedings of the ASME/STLE International Joint Tribology Conference, Oct. 24-26, 2011, Los Angeles, CA, USA.

[Ci9] V.-H. Nhu, A. Saulot, M. Renouf. Influence of Wear Particles on Contact Dynamics. IJTC2011 - Proceedings of the ASME/STLE International Joint Tribology Conference, Oct. 24-26, 2011, Los Angeles, CA, USA.

[Ci10] M. Renouf. About Non Homogeneous Third-Body Flow. IJTC2011 - Proceedings of the ASME/STLE International Joint Tribology Conference, Oct. 24-26, 2011, Los Angeles, CA, USA.

[Ci11] M. Renouf. Physico-chemical modeling of contact interface. IJTC2010 - Proceedings of the ASME/STLE International Joint Tribology Conference, Oct. 17-20, 2010, San Francisco, CA, USA.

[Ci12] M. Mbodj, M. Renouf, L. Baillet,Y. Berthier. Modeling of Carbon/Carbon Composites under tribological SolicitationsProceedings of the ASME/STLE International Joint Tribology Conference, Oct. 17-20, 2010, San Francisco, CA, USA.

[Ci13] M. Renouf, H.-P. Cao, V.-H. Nhu, Relation between the multi-scale and the multiphysical feature of a tribological contact interface, ECCOMAS 2010, IV European Conference on Computational Mechanics Solids Proceedings, May 16-21 2010, Paris, France.

[Ci14] C. Mbodj, M. Renouf, L. Baillet, Y. Berthier, Looking for representative volume element of c/c composite under tribological sollicitations, ECCOMAS 2010, IV European Conference on Computational Mechanics Solids Proceedings, May 16-21, 2010, Paris, France.

[Ci15] C. Mbodj, G. Peillex, M. Renouf, L. Baillet, Y. Bethier. Influence of the elasticated of Carbon/Carbon (C/C) under dynamic condition of rubbing contact, Euromech 2009, Lisboa, Portugal.

[Ci16] H.-P. Cao, M. Renouf and F. Dubois, Impact of interaction laws and particle modelling in discrete element simulations. PG2009 - Proceedings of the 6th international conference on Micromechanics of Granular Media, pp. 788-793, Golden, Colorado, 13-17 July 2009.

[Ci17] M. Renouf, H. Berro and N. Fillot, Mechanical and Thermal Effect for Complex Fluid Modeling usig Discrete Element Approaches, proceedings of the AFI/TFI 08, pp. 20-21, Sendai, Japan, 20-21 December, 2008.

[Ci18] D. Richard, I. Iordanoff, M. Renouf and Y. Berthier, Thermal Study of the Dry Sliding Contact with Third-body Presence, Proceedings of the ASME/STLE International Joint Tribology Conference, Oct. 20-22, 2008, Miami, FL, USA.

[Ci19] A. Saulot, M. Renouf and Y. Berthier, FEM-DEM Dialogue for Tribological Understanding, Proceedings of the ASME/STLE International Joint Tribology Conference, Oct. 20-22, 2008, Miami, FL, USA.

[Ci20] H.-P. Cao, F. Dubois and M. Renouf, Hybrid discrete-element approach. Applications to tribological interfaces, 4th International Conference on advanced computational methods in engineering (ACOMEN 2008), 26-28 juin 2008, Liège, Belgique.

[Ci21] N. Fillot, D. Richard and M. Renouf Friction through DEM simulations : the necessity of a multi-scale approach, in DEM07 proceedings, August 27-29, Brisbane, Australia.

[Ci22] F. Dubois and M. Renouf Numerical strategies and software architecture dedicated to the modelling of dynamical systems in interaction. Application to multibody dynamics, in Multibody 2007 proceedings, 25-28 June 2007 - Politecnico di Milano, Milano, Italy.

[Ci23] M. Renouf and V. Acary, Comparisons and coupling of algorithms for collisions, contact and friction in rigid multibody simulations, in : III European Conference on Computational Mechanics Solids Proceedings, C.A. Mota Soares et.al. (eds.), Lisbon, Portugal, 5-9 June 2006.

[Ci24] M. Renouf, A. Saulot and Y. Berthier, Third-body flow during a wheel-rail interaction, in : III European Conference on Computational Mechanics Solids Proceedings, C.A. Mota Soares et.al. (eds.), Lisbon, Portugal, 5-9 June 2006.

[Ci25] S. Descartes, M. Renouf, N. Fillot, B. Gauthier, A. Descamps, Y. Berthier and Ph. Demanche, A New Mechanical-Electrical Approach of the Wheel-Rail Contact, in 7th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems Proceedings, Brisbane (Australie), 24-26 September 2006.

[Ci26] M. Renouf, D. Bonamy, P. Alart and F. Dubois, «Influence of the lateral friction on the surface flow : a 3D numerical approach», in : Powder & Grains 2005 Proceedings, Stuttgart, Germany, 18th-22nd July 2005.

[Ci27] M. Renouf, V. Acary and G. Dumont, «Comparison of Algorithms for collisions, contact and friction in view of Real-time applications», In : Multibody Dynamics

2005 proceedings (International Conference on Advances in Computational Multibody Dynamics. ECCOMAS Thematic Conference), Madrid, 21-24 June 2005.

[Ci28] P. Alart, D. Dureisseix, M. Renouf, Using nonsmooth analysis for numerical simulation of contact mechanics, in : Progresses in Nonsmooth Mechanics and Analysis, Kluwer Academic Press, 2005.

[Ci29] M. Renouf and P. Alart, «Gradient Type Algorithms for 2D/3D Frictionless/Frictional MultiContact Problems», ECCOMAS 2004, P. Neittaanmaki, T. Rossi, K. Majava, and O. Pironneau (eds.) R. Owen and M. Mikkola (assoc. eds.) Jyvaskyla, Finland, 24-28 July, 2004.

[Ci30] M. Renouf and Y. Kishino, «A short comparison between the Granular Element Method and the Non Smooth Contact Dynamics method», in JSPS summer program 2003 (CNRS - MEXT), pages 136-142, 2003.

Actes de Conférences nationales (13)

[Cn1] J. Riviere, M. Renouf, Y. Berthier. Simulation du comportement thermique d'un milieu continu équivalent par méthode des éléments discrets. Actes du 11e colloque national en calcul des structures, 13-17 Mai 2013, Giens (Var).

[Cn2] M. Champagne, M. Renouf, Y. Berthier. Endommagement et comportement en frottement de matériaux biphasiques. Actes du 11e colloque national en calcul des structures, 13-17 Mai 2013, Giens (Var).

[Cn3] V.-H. Nhu, M. Renouf, Y. Berthier. Couplage FEM/DEM pour l'interaction entre instabilités dynamiques et débits de troisième corps dans un problème tribologique. Actes du 11e colloque national en calcul des structures, 13-17 Mai 2013, Giens (Var).

[Cn4] P. Bernard, M. Renouf. Modélisation discrète de structures tissées, lien entre les propriétés microscopiqueset macroscopiques. Actes du 10e colloque national en calcul des structures, 9-13 Mai 2011, Giens (Var).

[Cn5] M. Mbodj, M. Renouf, L. Baillet,Y. Berthier. Identification et Rôle des Paramètres Significatifs dans les Modélisations des Composites Carbone/Carbone (C/C) sous Sollicitations Tribologiques. Actes du 10e colloque national en calcul des structures, 9-13 Mai 2011, Giens (Var).

[Cn6] V.-H. Nhu, M. Renouf, Y. Berthier. Dialogue entre éléments finis - éléments lattices - éléments discrets pour un problème tribologique. Actes du 10e colloque national en calcul des structures, 9-13 Mai 2011, Giens (Var).

[Cn7] H.-P. Cao, M. Renouf, Y. Berthier. Couplage de modèles rigides et déformables pour la modélisation d'une interface tribologique. Actes du 10e colloque national en calcul des structures, 9-13 Mai 2011, Giens (Var).

[Cn8] C. Mbodj, G. Peillex, M. Renouf, L. Baillet et Y. Bethier, Influence du contraste des propriétés élastiques des composites Carbone/Carbone sous conditions dynamiques de contact frottant, Actes du 9e colloque national en calcul des structures, Vol. 2, pp. 695-700, 25-29 Mai 2009, Giens (Var).

[Cn9] T. Champelovier et M. Renouf, Modèles multiphysiques par éléments discrets - Application à la modélisation du troisième corps, Actes du 9e colloque national en calcul des structures, Vol. 2, pp. 665-670, 25-29 Mai 2009, Giens (Var).

[Cn10] Y. Berthier, H.-P. Cao, V.-H. Nhu, M. Renouf et A. Saulot, Couplage et dialogue entre approches discrètes et continues pour la tribologie numérique, Actes du 9e colloque national en calcul des structures, Vol. 1, pp. 155-160, 25-29 Mai 2009, Giens (Var).

[Cn11] D. Richard, M. Renouf , I. Iordanoff and Y. Berthier Thermique des contacts glissant en présence de troisième corps solide, dans Actes du 18e Congrés Français de Mécanique, 27-31 Aout 2007, Grenoble, France.

[Cn12] F. Dubois, M. Renouf et M. Jean, Extensions d'une méthode par éléments discrets pour la modélisation de milieux divisés complexes, dans Actes du 8e Colloque en Calcul des Structures, 21-25 Mai 2007, Giens (Var).

[Cn13] P. Alart et M. Renouf, «Un nouvel algorithme de quasi-optimisation pour la résolution des problèmes multi-contacts et applications aux milieux granulaires», Actes du 16e Congrès français de mécanique (AFM), Nice 1-5 sep. 2003.

Rapports de recherche (3)

[R1] M. Renouf, P. Lugt, J. Tripp. Grease flow modelling : A discrete element approach. Final Report on Project SKF No. N04 001, 2009.

[R2] Y. Berthier, G. Bremond, H. Chollet, A. Descamps, S. Descartes, M. Renouf, B. Gautier, C. Godeau. Analyse tribologique «mécano-électrique» du contact roue-rail, rapport final du projet SNCF 98540.4.2.0008, 2008.

[R3] Y. Berthier, C. Godeau, M. Renouf. Etude expérimentale de l'usure des grains de ballast pour l'écriture d'une loi de frottement fonction de l'usure. Rapport final du projet SNCF 03000-0000000092, 2009.

Conférences invités (2)

[K1] M.Renouf, Advances in third-body modeling, GRC Conference on Tribology, 27 Juin - 02 Juillet 2010, Colby College Waterville, ME, USA.

[K2] Extended Discrete Element Method for Mechanical and Thermal modelling of Tribological Complex Fluid, AFI/TFI 2008 - 8th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisplinary Fluid Integration, Dec. 19th-20th 2008, Tohoku University, Sendai, Japan.

Communications orales (19)

[O1] "Quelles limites à la modélisation des interfaces tribologiques", JIFT, 26-28 mai 2014, Mulhouse (Haut-Rhin).

[O2] "Physico-chemical investigations of third-body flows", ACT2014, 27-30 avril 2014, Marrakesh, Maroc.

[O3] "Tribologie numérique discrète : mythe ou réalité ?", 50 ans de tribol à l'INSA-Lyon, 10-12 octobre 2012, Villeurbanne.

[O4] "Numerical Dialogue Between Tribological Scales", 13e JMC, 28-31 août 2012, Montpellier.

[O5] "About Non Homogeneous Third-Body Flow". ASME/STLE IJTC, 24-26 octobre 2011, Los Angeles, CA, USA.

[O6] "Identification et Rôle des Paramètres Significatifs dans les Modélisations des Composites Carbone/Carbone (C/C) sous Sollicitations Tribologiques". 10e Colloque CSMA, 9-13 Mai 2011, Giens (Var).

[O7] "Physico-chemical modeling of contact interface". ASME/STLE IJTC, 17-20 octobre 2010, San Francisco, CA, USA.

[O8] "Extended discrete element method for the multiscale and multiphysical modeling of third-body flows", PART 2009, ECCOMAS Thematic Conference, 21-23 octobre, 2009, Nantes (Loire-Atlantique).

[O9] "Simulations Numériques en Tribologie et en Mécanique des Contacts", Colloque Carnot, 6 octobre 2009, Paris-Bercy (Paris).

[O10] "FEM-DEM Dialogues for numerical understanding", ASME/STLE IJTC, 20-22 Octobre 2008, Miami, FL, USA.

[O11] "Thermal Study of Dry Sliding Contact with third body presence", ASME/STLE IJTC, 20-22 octobre 2008, Miami, FL, USA.

[O12] "Tribologie Discrète et Modèles Multi-Physiques : Application au problème de shuntage", Séminaire LMGC, 16 octobre 2008, Montpellier (Hérault).

[O13] "Non Smooth approaches for the simulation of divided media", GdR CHANT workshop", ENPC, 19-21 novembre 2007, Marne-la-vallée (Marne).

[O14] "Extensions d'une méthode par éléments discrets pour la modélisation de milieux divisés complexes", 9e Colloque CSMA, 21-25 Mai 2007, Giens (Var).

[O15] "Modèles par éléments discrets cohésif non régulier. Application à la tribologie", Séminaire LaMUSE, Saint Etienne, 15 octobre 2006, Saint-Etienne (Loire).

[O16] "Non Smooth Contact Dynamics. Des problèmes géophysiques aux simulations temps-réel". Séminaire CEA Saclay, 12 juin 2006, Gif-sur-Yvette (Essonne).

[O17] "Comparisons and coupling of algorithms for collisions, contact and friction in rigid multibody simulations", III ECCM, 5-9 juin 2006, Lisbon, Portugal.

[O18] "Third-body flow during a wheel-rail interaction", III ECCM, 5-9 juin 2006, Lisbon, Portugal.

[O19] "Comparison of Algorithms for collisions, contact and friction in view of Real-time applications", Multibody Dynamics - ECCOMAS Thematic Conference, 21-24 juin 2005, Madrid, Espagne.

Synthèse Scientifique

CHAPITRE 1

Introduction

1.1 Bref historique

La notion de frottement est complètement intégrée à nos comportements quotidiens au travers de petits gestes simples comme tenir un crayon, se brosser les dents, marcher, etc. D'un point de vue plus pragmatique, il est également au centre de nombreuses problématiques industrielles (stabilité des structures [63, 110], durée de vie des mécanismes [61, 108, 159], différentes formes d'usure [19, 27], crissements de freins [65, 99] ou de hanches [115], ...) et économiques (coût de l'ordre de 2,5% du PIB de la France, dépense d'énergie, ...) : dans le contexte automobile, les pertes dues au frottement (freinage exclu) représente 28% l'énergie liée au carburant [70]. Pour ces multiples raisons, et cela depuis les temps historiques (voir les tribologues des fresques égyptiennes [47]), l'homme essaye de minimiser ou de maximiser le frottement en fonction de ses besoins.

Cela n'est qu'à partir de la renaissance avec les travaux non publiés/perdus de Leonardo Da Vinci (1453-1519), suivi de ceux de Guillaume Amontons (1663-1705), de de Bélidor (1737), et de Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806), que l'homme commence à mettre en forme le frottement aux travers de lois [1]. Il faudra ensuite attendre 1950 pour voir les premières théorie sur l'adhésion (Bowden et Tabor [27]) et 1953 pour voir apparaître les premières lois d'usure (proposée par Archard à partir d'essais piondisque [8, 9]) faisant intervenir le volume usé, la charge normale appliquée, la distance parcourue ainsi qu'un paramètre de calage k. De cette loi et de ces dérivées premières, en naquirent plus d'une centaine d'autres différentes [87, 102] partant du fait que plus le nombre de paramètres est grand plus il est facile de coller aux résultats expérimentaux. Pour palier à cet aspect générique, Lim et al [87] proposerons des cartes d'usure, fonctions d'une vitesse V et d'une pression de contact P non dimensionnées, permettant de caractériser le type d'usure (douce, sévère, délaminage,...). Mais ce type d'approche s'avérera vite non transposable d'une condition de contact à une autre.

1. Les travaux d'Amontons et de Coulomb peuvent se résumer en les trois points suivants :
   — la force de frottement est directement proportionnelle à la charge appliquée (1er loi d'Amontons) ;
   — la force de frottement est indépendante de l'aire de contact apparente (2e loi d'Amontons) ;
   — Le frottement cinétique est indépendant de la vitesse de glissement (Loi de Coulomb).

L'une des raisons essentielles aux difficultés rencontrées jusqu'alors est que les problèmes de frottement et d'usure sont, comme de nombreux problèmes, multi-échelles et multi-physiques par nature, et qui de plus sont fortement couplés. D'un point de vue mécanique, les contraintes au niveau du contact dépendent du contact lui-même ainsi que du mécanisme global. D'un point de vue matériau, les matériaux constituant les corps en contact (premiers corps) et l'interface (troisième corps [67]) répondent au contraintes en exhibant des comportement complexes. De plus, les modèles de frottement et d'usure doivent faire face à la grande complexité des phénomènes mécaniques, thermiques et physico-chimiques siégeant au sein du contact affectant les différents paramètres utilisés dans les modèles ; la complexité résultant du grand nombre de paramètres fortement couplés.

1.2 Point de vue tribologique : existence et unicité ?

De cette complexité, impliquant différentes échelles et physiques, naquirent de nombreuses façon d'appréhender un problème de tribologie aussi bien d'un point de vue théorique, expérimental que numérique, d'où une des questions naturelles : faut-il parler de frottement ou de frottements ? [141]. En effet, il suffit de parler avec des tribologues de différentes sensibilités pour entendre évoquer les notions de frottement sec [109] ou lubrifié [148] , de frottement statique [113] ou dynamique [139] , de frottement interne [162] ou encore atomique [66, 163]. Ainsi suivant *l'école* d'appartenance, le coeur d'un problème tribologique peut aussi bien reposer sur les propriétés matériaux, l'état de surface géométrique ou physico-chimique ou encore la caractérisation atomique, conduisant parfois à faire des postulats dans des contextes spécifiques et à les rendre génériques sans forcément prendre les précautions adéquates.

Le concept novateur de "triplet tribologique", proposé dans les années 80 par Godet [67], prend à contre-pied les schémas conventionnels en soulignant l'importance de résoudre un problème tribologique en considérant à la fois les corps en contact, le mécanisme les contenant, et l'interface les séparant ; cette dernière est alors baptisée troisième corps en référence aux deux corps quelle sépare.

Cette notion de triplet s'affranchit complètement de la notion d'échelle spatiale et propose plutôt un cadre d'échelles relatives : l'échelle de l'interface de contact, par exemple, peut avoir une épaisseur de plusieurs mètres (la gouge dans les structures géologiques [85]) ou simplement quelques nanomètres (complexe ou écran de surface). Il en résulte également une grande disparité d'échelle aussi bien pour le mécanisme que pour les premiers corps. Le troisième corps peut aussi bien se présenter sous la forme d'un fluide (lubrifiant), de particules issues majoritairement de la dégradation des corps en contact ou encore d'un mélange de fluide et de particules dans diverses proportions : on parle alors respectivement de lubrification fluide, solide ou mixte mais le concept reste le même. Toutefois nous ne parlerons ici que de lubrification solide, appelé aussi contact sec.

De cette liberté d'échelle résulte une attention particulière quant aux phénomènes étudiés, car qui dit différentes échelles dit différentes physiques (et donc caractérisation). En effet, il semble presque sur que les phénomènes de contact se produisant à l'échelle tectonique ne seront pas ceux siégeant au sein par exemple de "micro-capteur", même si il

existe parfois des similitudes [39]. Il faut donc dresser un bilan rigoureux des "physiques" impliquées afin de faire un choix parmi celles qui seront retenues et étudiées. Nous nous focaliserons dans la suite à des systèmes dont l'épaisseur du troisième corps est comprise entre 1 et 50μm et nous préciserons par la suite les physiques prises en compte.

Chaque élément du triplet bénéficie de ses propres moyens de caractérisation. Il est ainsi possible d'effectuer certaines mesures dynamiques et de nombreuses observations post-mortem (observation photonique, électronique,...). Mais d'un point de vue expérimental, on peut noter au minimum cinq difficultés pour étudier un contact :

1. la géométrie du contact où la faible épaisseur rend difficile voire impossible la pratique de mesures sans perturber les mesures elles-mêmes ;
2. les trois éléments composant le système tribologique (mécanisme, premiers corps et troisième corps) agissent simultanément, rendant ainsi difficile la détermination de l'élément moteur renvoyant au problème du serpent qui se mord la queue ;
3. la réponse des matériaux aux contraintes tribologiques, notant toutefois que l'effet de la pression reste peu étudié si ce n'est dans les travaux liés aux Transformations Tribologiques Superficielles (ou TTS [19, 28, 52]) ;
4. les mesures tribométriques, prises loin du contact, sont souvent difficiles à extrapoler car elles ne correspondent pas toujours aux charges mécaniques spécifiques locales ainsi qu'aux conditions physico-chimiques de contact ;
5. les observations post-mortem permettent difficilement de retracer l'historique du contact.

Ces difficultés identifiées ne forcent pas les tribologues à renoncer à étudier le frottement d'un point de vue expérimental, bien au contraire. Cependant, l'outil expérimental seul ne suffisait plus a résoudre un problème de tribologie, et il du être épaulé par un outil complémentaire autre que les modèles de contact empiriques qui sont souvent mis en défaut de par leurs hypothèses souvent très restrictives.

1.3 Tribologie numérique

Pour palier aux difficultés expérimentales, les tribologues, au même titre que d'autres chercheurs dans de nombreuses disciplines, ont alors recours aux outils numériques. Ces derniers permettent de réaliser des simulations à différentes échelles, et bénéficient du fait qu'il est possible de faire varier un paramètre à la fois, possibilité quasi inexistante expérimentalement. Chaque échelle a su ainsi tirer profit des nombreuses approches disponibles en se les appropriants puis en les améliorants proposant aussi bien des modèles robustes et rapides que des modèles complets et complexes, tout ceci faisant de la "tribologie numérique", une science riche et variée.

Suivant le concept du triplet tribologique, on pourrait faire un état de l'art complet de l'ensemble des méthodes disponibles à chaque échelle. Ce travail étant déjà été fait en partie [22, 130], nous nous contenterons de donner ici uniquement les grandes lignes des modèles utilisés pour la modélisation du comportement dynamique des mécanismes et des premiers corps sous sollicitations tribologiques pour ensuite pointer leurs limites et définir une stratégie afin de les repousser, si ce n'est de les faire tomber.

1.3.1 Mécanismes et premier corps

Si pendant de nombreuses décennies, les modèles analytiques utilisés pour étudier les problèmes de frottement et d'usure ont fait office de références, ils ont été pointés du doigt dans les années 90 [93] pour leur inadéquation à la réalité des problèmes de tribologie et leurs hypothèses tendancieuses : évolution monotone du frottement et du taux d'usure en fonction des variables utilisées, indépendance vis à vis de l'historique d'un contact, indépendances des paramètres influents,... Ils trouvent ainsi leurs limites lorsqu'il faut prédire la durée de vie d'un système mécanique tel qu'un roulement, un disque à aubes ou un système de freinage.

Un tel problème demande à la fois de pouvoir étudier le mécanisme complet jusqu'à la rupture ou jusqu'à sa "fin de vie"[2], mais aussi de comprendre les transformations subies par les éléments en contact (par exemple, l'usure ondulatoire i.e. les déformations plastiques périodiques [140], la dégradation des surfaces [40, 81]). Pour trouver une solution au problème posé, à savoir la relation entre frottement et usure, il faut alors pouvoir modéliser à la fois les corps en contact et le mécanisme les contenant.

Cependant, il peut s'avérer lourd et fastidieux de mettre en place un modèle proposant de modéliser un mécanisme complet avec une description précise des différents éléments. De cette complexité sont nés deux types d'approches distinctes - les modèles analytiques ou semi-analytiques et les méthodes par éléments finis - qui souvent mises en opposition, n'en restent pas moins complémentaires.

1.3.1.1 Modèles semi-analytiques

Les modèles semi-analytiques sont les premiers modèles utilisés pour simplifier les problèmes de contact impliquant un mécanisme ou étudiant le comportement d'un corps sous sollicitations de contact sur une longue période temporelle. Ce type d'approche est le plus souvent utilisé pour modéliser le fonctionnement d'un mécanisme sur des durées de plusieurs milliers d'heures, voire plus. Le caractère semi-analytique vient du fait que ces approches mélangent modèles analytiques (pouvant être fonction du temps sans garder un historique de leur évolution) et simulation numérique (évolution temporelle du système). Vu le nombre de cycles visé, le temps de calcul apparaît être une contrainte importante ce qui conduit à utiliser des modèles simplifiés autant pour le comportement volumique des corps en contact (déformations plastiques, présence d'inclusions rigides,...) que pour les conditions de contact (loi de frottement, loi d'usure - au sens éjection de particules-), rendant les méthodes efficaces, mais difficilement transposables [60]. Il s'agit alors plus d'outils de résolution (au sens données quantitatives) que d'outils de compréhension, car les phénomènes sont presque toujours découplés. La littérature est très riche de ces modèles et on ne peut les énumérer tous. Pour citer quelques applications, on retrouve ce type de modèle pour étudier le comportement de contact type fretting [59, 61] se basant sur des modèles d'usure et de contact élasto-plastique [6], ou encore pour modéliser le comportement des roulements à billes [108, 158, 159] en simplifiant les interactions entre éléments par des lois de contact visco-élastique.

2. Cette notion de "fin de vie" n'est pas nécessairement associée à la rupture du système mais à un état limite pouvant correspondre par exemple à un taux d'usure ou tout autres critère s mécaniques

1.3.1.2 Approches par éléments finis

Les méthodes par éléments finis sont parmi les méthodes numériques les plus répandues pour résoudre un problème de contact avec frottement entre deux corps déformables [164]. Curieusement les tribologues se sont peu intéressés à ce type de méthode. L'une des raisons probables est le coût de calcul pouvant être très élevé en comparaison aux approches analytiques ou semi-analytiques utilisées jusqu'alors. Il faut attendre la fin des années 1980 pour les voir se répandre dans les journaux de tribologie [69] pour être aujourd'hui une des méthodes indispensables pour résoudre un problème de contact où le comportement des corps impliqués et du mécanisme est au centre du problème. Les modèles sont ainsi de vrais outils de compréhension, mais parfois peu efficaces en terme de rapidité. Comme pour les modèles semi-analytiques il est difficile de citer l'ensemble des travaux invoquant des problèmes de contact et des méthodes par éléments finis. Cette combinaison met en jeu aussi bien le développement de théories de convergence et d'unicité de solution [13], que le développement d'algorithmes performants [3, 79, 124, 161]. On retrouve ainsi des travaux essayant de comprendre le comportement de matériaux composites sous sollicitations tribologiques [101, 117], le développement des instabilités de contact [88], le développement de loi d'usure en bio-mécanique [78], la rupture au contact [12, 152], les aspects crissement [97, 98] ou les problèmes de génération et propagation d'onde [2, 15, 44]. Le lecteur trouvera de nombreuses références sur les différents domaines à l'intérieur des documents cités.

1.3.2 Tribologie numérique discrète

Lorsque l'on focalise sur l'interface qui sépare deux corps en contact, on peut remarquer que celle-ci s'écoule, sous certaines conditions (fortes pressions et vitesses de cisaillement), comme un fluide complexe. En effet, Godet [67] et Berthier [18] ont mis en évidence que cette interface plus ou moins hétérogène et discontinue, plus communément appelée en tribologie "troisième corps", pouvait avoir des épaisseurs variables (allant de quelques nano-mètres à plusieurs dizaines de micro-mètres) et s'écouler avec une rhéologie inconnue a priori. On retrouve ce troisième corps de façon artificielle dans la lubrification par poudre mais dans ce cas les propriétés du milieux sont connues a priori. Cependant l'évolution de ce milieu et son comportement face aux fortes pressions et vitesses de cisaillement peut évoluer, rendant complexe l'interprétation des résultats.

Deux types d'approches sont communément utilisées pour modéliser les écoulements de troisième corps : les approches continues et les approches discrètes. Les approches continues proposent des extensions de modèles issues de la mécanique des milieux continus et sont utilisées essentiellement dans des applications impliquant la lubrification par poudre (palier à poudre de charbon ou métallique), autrement-dit en utilisant un troisième corps artificiel. Mais avoir une vision continue de ce type d'interface ne permet pas toujours de représenter la réalité d'un contact, en particulier lorsque le débit d'usure est pris en compte ou lorsque les écoulements de troisième corps ne sont pas en régime stationnaire (et c'est rarement le cas). Dans le cas d'un troisième corps naturel (issue en majeure partie des corps en contact), les hypothèses de continuité sont difficilement préservées et dans ces conditions, nous sommes alors en droit de nous demander si cette mécanique reste valide et quelles en sont les limites. Ce questionnement à pousser les

tribologues a utiliser les approches par éléments discrets pour décrire l'évolution de ce milieu discontinu afin d'en déduire un comportement rhéologique contrairement à la lubrification fluide où la rhéologie est introduite dans le modèle mais mesurée hors du contact.

C'est dans les années 90 que les méthodes par éléments discrets sont, pour la première fois, utilisée à des fins tribologiques [53] pour simuler la lubrification des paliers à poudre. Le troisième corps est représentée par une collection de disques rigides évoluant entre deux plans inclinés rugueux. Ces travaux ouvrent alors la voie à de nombreux travaux. Les premiers sont tout d'abord très exploratoires et concernent l'influence des différents paramètres numériques [91, 92] et géométriques (taille des échantillons et des particules) [64] sur la réponse mécanique du milieu. Une réflexion sur l'optimisation de ses approches est également faite en essayant d'étendre les techniques multi-grilles [36] utilisées communément en elasto-hydrodynamique à la lubrification solide. Ensuite des lois plus représentatives des phénomènes mis en jeu au sein d'une interface sont utilisées [143] et l'influence de la taille des particules et de la cohésion entre particules sur le comportement des écoulements est étudiée.

Ces méthodes sont ensuite étendues à l'étude des mécanismes d'usure. Lors de cisaillements simples [57, 58], certains auteurs proposent des lois d'usure basées sur les approches discrètes mais l'adimensionnement est fait via des paramètres dépendants conduisant à des résultats particuliers et non génériques. D'autre travaux s'intéressent aux débits de troisième corps (sans procéder à un quelconque adimensionnement) dans des simulations type fretting [131], conditions dans lesquelles les notions de débits ont souvent été oubliées [59].

En parallèle des approches à l'échelle micro, les modèles atomiques à l'échelle moléculaire ont fait d'énormes progrès dans la modélisation du contact entre solide, proposant aujourd'hui de nombreux travaux. Les travaux de Robbins [90, 135] suivi de ceux de Molinari [5] ont permis, entre autre, de revisiter la notion d'aire réelle au contact en couplant dynamique moléculaire et approche par éléments finis, ceux du groupe de Martini [62, 96] oeuvrant à rendre les approches par dynamique moléculaire plus qualitatives en comparant et en enrichissant les approches dynamique moléculaire (ou MD pour Molecular Dynamics) tout en les comparants à des expériences par AFM [3] ou encore ceux du groupe de Moseler [137] simulant la plasticité de nano-crystaux métalliques.

1.4 Limites ?

Aujourd'hui l'utilisation des méthodes discrètes est devenue incontournable en tribologie : de la présence de sessions dédiées dans les conférences nationales et internationales à la volonté de certains industriels à les exploiter pleinement pour répondre à leurs attentes. Mais même si elles ont permis de franchir un pas important dans la modélisation des interfaces de contact, de nombreux points clés restent encore à être pris en compte pour sortir du cadre purement phénoménologique et pouvoir prétendre tendre vers la mise en place de modèles prédictifs.

La première chose a garder à l'esprit est que, dans la plupart des travaux touchant

3. Atomic Force Microscopy

la lubrification solide, une particule numérique ne représente pas une particule réelle. Le volume élémentaire numérique représente un volume élémentaire réel (faible pourcentage du volume séparant les corps en contact !) dont la représentativité reste à déterminer. Deux alternatives s'offrent à cette vision. La première est de dire qu'une particule numérique représente une particule réelle et la seconde est de dire qu'une particule numérique représente le plus petit élément de matière dont la taille est pertinente : une particule réelle est alors vue comme un ensemble de particules numériques. Quoi qu'il en soit, dans les deux cas, il faut alors connaître le comportement interne de la particule (loi de comportement volumique dans le premier cas et loi de cohésion interne dans le second cas) ainsi que la ou les lois d'interaction entre particules. Cette tâche est d'autant plus complexe que l'on ne sait pas toujours définir correctement ce qu'est une particule réelle.

Si l'on revient au cas usuel, il faut alors choisir, de la manière la plus rigoureuse possible, la ou les lois d'interactions qui vont piloter l'évolution des particules. Si il reste possible de trouver des lois d'interactions pertinentes lorsque la rhéologie d'échantillon de particules sub-millimétriques est étudiée, la tâche est plus complexe lorsque les particules sont de taille micrométrique (voire inférieure) et évoluent dans un milieu confiné rendant la détermination des interactions quasi impossible. Dès lors, les lois utilisées alors prennent en compte des "ingrédients" représentant les différents comportements que le modélisateur pense (souhaite ?) présents au coeur du contact (élasticité, plasticité, amortissement,...). Ce choix, indispensable dans l'attente de données expérimentales, n'est alors pas unique. Ainsi, en vu de pouvoir proposer des modèles prédictifs, des lois d'interaction utilisées, il faut pouvoir déterminer l'impact des parts physique et numérique dans les quantités macroscopiques mesurées.

Un autre des défauts majeurs des modèles discrets utilisés en tribologie est d'occulter la présence des premiers corps ou du moins de les considérer comme rigide. Si la taille du volume est suffisamment petite alors, considérer le premier corps rigide semble une hypothèse acceptable. Toutefois le volume étudié ne représente alors qu'un très faible pourcentage de l'aire de contact et les grandeurs macroscopiques mesurées ne sont nullement représentative de toute l'aire de contact. Dans le cas contraire, sous entendue que le volume étudié représente un fort pourcentage de l'aire de contact, le caractère rigide du premier corps est plus que discutable. En effet, aucune accommodation de déformation n'est possible et le premier corps rigide va avoir tendance à perturber la rhéologie de la couche de troisième corps. Pour étudier le comportement d'une interface tribologique [4], il faut alors pouvoir prendre en compte localement le côté déformable des premiers corps ainsi que leur possible dégradation et arriver à faire remonter ces informations à l'échelle plus globale du contact. Il faut donc étendre les approches classiques en intégrant l'accommodation de déformation au niveau des premiers corps ou en homogénéisant l'information obtenue à l'échelle locale et la remonter à l'échelle supérieure.

Les limites des modèles ne concernent pas uniquement les aspects purement mécanique. En effet, le frottement s'opposant au mouvement relatif de deux corps en contact, n'implique pas uniquement des phénomènes mécaniques, mais met en jeu des aspects thermiques, physico-chimiques et parfois même électriques. Les modèles discrets doivent

4. La notion d'interface tribologique désigne un volume élémentaire contenant une modélisation du troisième corps ainsi qu'une partie des premiers corps formant le contact ; on retrouve dans un sens le schéma des sites d'accommodation proposé par Berthier [18]

donc être enrichis en conséquence afin de pouvoir prendre en compte ses aspects multi-physiques. Il faut toutefois développer les modèles de façon rigoureuse afin de ne pas induire de nouveaux biais numériques et rester conscient des limites de ces nouveaux modèles.

1.5 Stratégie

Le fil conducteur à toutes ces interrogations repose sur le *Saint-Graal de la modélisation tribologique*, à savoir pouvoir modéliser le comportement dynamique de l'usure, qui n'est autre que la mise en place du circuit tribologique [18] d'un point de vue numérique. Par "comportement dynamique de l'usure" on entend le fait de pouvoir partir d'une modélisation continue des corps en contact, transformer dans des zones d'intérêt la modèle continu en un modèle discontinu équivalent afin de pouvoir regarder son possible endommagement et être capable de regarder l'évolution des débris créés et leur impact sur les corps en contact.

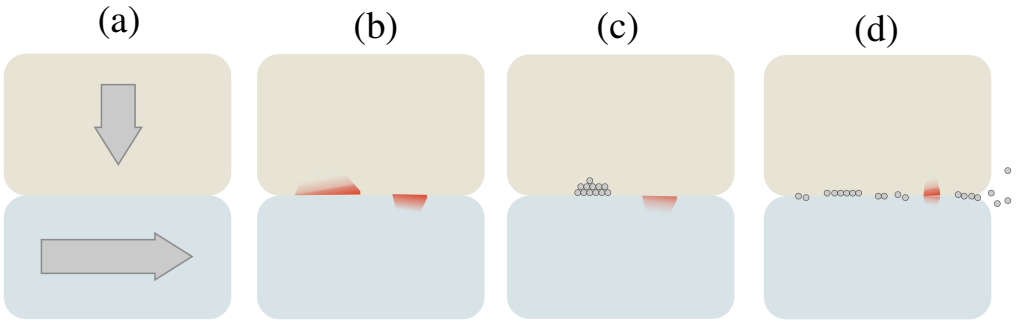


Figure 1.1 – *Représentation du Saint-Graal de la modélisation tribologique : à partir de la modélisation continue des corps en contact (a), transformer dans des zones d'intérêt (b) la modèle continu en un modèle discontinu équivalent (c) afin de pouvoir regarder son possible endommagement et être capable de regarder l'évolution des débris créés et leur impact sur les corps en contact (d).*

Cette idée, qui paraître simple dite en quelques mots, n'en demande pas moins la mise en place[5] de méthodes numériques permettant à un domaine donné de passer d'un état continu à un état discontinu, mais aussi le choix de critères de transition d'états pertinents, l'utilisation de méthode permettant de simuler simultanément un milieu continu et une interface discontinue ou encore un milieu continu avec prise en compte implicite de l'interface[6].

La synthèse des travaux présentés dans la suite de ce manuscrit retrace donc une stratégie mise en place depuis plusieurs années rassemblant des travaux qui se veulent vouloir repousser les limites soulevées précédemment et proposer des voies de recherches

5. Par mise en place, on entend aussi bien développement théorique qu'implémentation informatique, car si parfois les idées semblent simples et naturelles leur mise en oeuvre peut faire appel à de nombreuses compétences techniques et des architectures logiciels adaptées

6. Cette thématique est contenu dans le projet de recherche qui m'a permis d'intégrer le CNRS en Octobre 2005.

dans cette thématique. Gardant les approches discrètes comme fil conducteur, nous allons voir de quelles façons elle s'avère être un formidable outil d'aide à la compréhension et venir ainsi épauler les techniques expérimentales. Nous montrerons également comment il est possible de l'enrichir et de les coupler à d'autres méthodes numériques afin d'aller plus loin dans la compréhension de la notion de frottement et du rôle du troisième corps.

Ainsi ce travail de synthèse s'articule en quatre grands chapitres et est guidé à la fois par les concepts de triplet tribologique et circuit tribologique [18].

Le premier chapitre est dédié à la rhéologie des troisième corps solides en l'absence de débit source et de débit d'usure. Dans un cadre purement mécanique (comprendre à comportement thermique/physico-chimique constant), nous reviendrons sur certains résultats de la littérature qui nous semblent importants de souligner en essayant de les replacer dans un contexte plus général et en proposant des pistes exploratoires permettant de de comprendre la convergence et/ou la divergence de certains résultats. Ensuite nous nous intéresserons à l'intégration de nouvelles physiques, et à la construction de modèle thermomécanique afin de modéliser les transferts thermiques dans une couche de troisième corps cisaillée et la construction de modèle électro-mécanique afin de regarder l'évolution du comportement résistif du troisième corps sous sollicitations dynamiques. Dans chaque cas nous soulignerons l'importance de prendre en compte le comportement physico-chimique de l'interface (de manière implicite ou explicite) afin d'avoir des modèles représentatifs. Ces modèles seront présentés et illustrés au travers d'applications tribologiques, aussi bien académiques qu'industrielles.

Dans le seconde chapitre, nous montrerons comment il est possible d'enrichir les modèles classiques de troisième corps en prenant en compte la présence des premiers corps. Nous montrerons quel impact a la présence d'un premier corps déformable sur des grandeurs moyennes telle que la force tangentielle macroscopique et la rhéologie du troisième corps puis nous discuterons de la relation entre rhéologie du troisième corps et instabilités de contact en l'absence de débit d'usure en présentant des résultats de simulation qualitatifs issus d'une comparaison entre modélisation expérimentale et numérique, puis clôturerons cette partie en introduisant des débits d'usure.

Dans le troisième chapitre, nous montrerons comment utiliser les méthodes par éléments discrets comme palliatif aux approches traditionnelles type éléments finis pour servir de représentations discrètes et ainsi permettre, si tant est qu'elles soient bien utilisées, une transition d'un état continu vers un état discontinu. C'est dans cette philosophie que nous nous intéresserons tout d'abord à l'évolution des débits de troisième corps pour des matériaux homogènes puis hétérogènes, en proposant une première démarche pour tendre vers une modélisation dynamique de l'usure. Nous conclurons cette partie en présentant une réflexion sur comment remonter l'information locale à une échelle plus globale, autrement dit une réflexion sur la mise en place d'une technique d'homogénéisation au contact.

Enfin le quatrième et dernier chapitre sera dédié à une synthèse de la démarche scientifique entrepris dans ce manuscrit. Nous reviendrons tout d'abord sur les trois chapitres en présentant les différentes perspectives que nous avons pu identifier. Ces perspectives seront suivies d'une discussion portant à plus long terme en confrontant les différents résultats vis à vis des concepts cités précédemment et qui ont conduit ce travail.

CHAPITRE 2

Troisième corps numérique : réalité ?

2.1 Introduction

Comme souligné en introduction, l'utilisation des méthodes discrètes est aujourd'hui devenue incontournable en tribologie. Apparues au début des années 90, elles restent peu exploitées (voire très controversées) pendant presque 10 ans, puis refont surface au début des années 2000, période où les méthodes par éléments discrets ont une popularité grandissante aussi bien au niveau national [104] qu'international (conférences Powder&Grains [1], Particle-based methods, ...). Même si elles offrent encore très souvent des résultats phénoménologiques, on voit apparaître aujourd'hui les premiers résultats qualitatifs, posant ainsi une pierre supplémentaire vers la longue route menant à la mise en place de modèles prédictifs, autrement dit au Graal tribologique.

Ce chapitre s'intéresse à la modélisation de l'écoulement des troisième corps solides en l'absence de débit source et de débit d'usure. Dans cette partie, nous travaillons dans un cadre purement mécanique sous-entendant que nous travaillons à comportement thermique et/ou physico-chimique constant. Dans une première section nous reviendrons sur le pourquoi de l'utilisation des méthodes discrètes a des fins tribologiques et sur certains résultats de la littérature qui nous semblent importants de souligner, tout en essayant de les replacer dans un contexte plus général qui est celui des écoulements granulaires. Dans une seconde section, nous montrerons alors comment il est possible d'enrichir les modèles classiques en intégrant des aspects multi-physiques. Les grandes lignes des modèles seront présentées et certains résultats discutés.

2.2 Ecoulements de troisième corps solides

2.2.1 Représentativité ?

En parcourant la littérature [21], il est déjà possible de faire la distinction entre troisième corps artificiels et naturels : le troisième corps artificiel est introduit dans le contact alors que le troisième corps naturel est issu de la dégradation des corps en

1. http ://www2.msm.ctw.utwente.nl/msm_www/AEMMG

contact, corps pouvant avoir également un revêtement particulier (matériaux autolubrifiant par exemple [122])

Pour les troisième corps artificiels type poudre, utilisé par exemple pour la lubrification de palier "à poudre" [160], la caractérisation d'une particule est presque une trivialité, si l'on occulte leur déformation et leur fort probable fragmentation, et l'utilisation des approches par éléments discrets est alors naturelle.

En ce qui concerne le troisième corps naturel, on s'aperçoit que les particules de troisième corps peuvent avoir des caractéristiques très différentes aussi bien en terme de géométrie, de taille, que de comportement et qu'encore aujourd'hui, ces caractéristiques peuvent dépendre de l'observateur. Peut-on alors définir une particule de troisième corps ou faut-il finalement les voir comme une nouvelle représentation du chat de Shroddinger où c'est la mesure qui dicte son identité ? Lorsqu'il est possible de les voir évoluer dans un contact [18,42,51], arrive-t-on vraiment à dissocier une simple particule ou est ce déjà l'observation de "macro-particules", agglomérats évolutifs de particules élémentaires [2] ? Concernant les observations que l'on fait en ouvrant le contact [46,95], celles-ci ne nous éclairent souvent pas plus car il est souvent difficile de retrouver les particules que l'on a pu observer, car empreintes de perturbations liées à l'arrêt et l'ouverture du contact, conduisant à l'erreur des films de transfert.

Faut-il alors pour autant ne pas faire le pas de la modélisation numérique de particules de troisième corps ? Le bon sens, au travers de la littérature, nous montre que la réponse est bien entendu non et ceci depuis les années 90 [53] où l'on peut voir les premières simulations discrètes à des fins tribologiques. La construction des premiers modèles se fait en trainant deux contraintes majeures étroitement liées. La première concerne la complexité d'une interface tribologique [3] et les multiples corrélations qui peuvent exister entre débits de particules de troisième corps, état de surface (géométrique et physico-chimique [1]) et dynamique des corps en contact. Dans une vision idéaliste, on souhaiterais voir tout ses ingrédients dans la même simulation, mixant descriptions discrète, continue et transition entre les deux états. C'est là qu'apparaît alors la deuxième contrainte liée aux limites des premiers modèles et des moyens de calculs rendant impossible ce type de simulation. De ce fait, c'est cette double contrainte qui a conduit à représenter l'écoulement du troisième corps par le cisaillement d'une cellule délimitée par deux parois parallèles rigides et des conditions périodiques (les conditions périodiques permettant de se placer dans un cadre idéaliste d'un contact infini permettant d'atteindre ainsi des états stationnaires) dans l'idée de pouvoir dupliquer cette cellule (par exemple par intégration....) et d'obtenir une mesure globale au contact.

Vient enfin la correspondance (identification) entre particules numériques et particules réelles, correspondance qu'il faut réaliser sur un certain volume élémentaire dont

2. Si on évacue les cas particuliers de l'écaillage ou du délaminage, pouvant conduire à des tailles de particules initialement importantes (quelques millimètres), les particules initialement détachées vont avoir une taille de quelques nanomètres, qui après agglomération vont former des amas de quelques micromètres, pouvant atteindre des tailles moyennes de 25 micromètres (si on reproduit le procéssus 10 000 fois on passe alors à l'échelle géophysique et on ne parle plus de troisième corps mais de gouge ! [85])

3. On désigne par interface tribologique, la combinaison du troisième corps et d'une partie des premiers corps proches du contact (peau) faisant ainsi référence aux mécanismes d'accommodation de vitesse [20].

la représentativité sera à déterminer.

Finalement, deux solutions s'imposent. La première, qui est plutôt une vision macro, est de dire qu'une particule numérique représente un ensemble de particules réelles mais ce choix n'a vraiment de sens que si il l'épaisseur de troisième corps modélisée est suffisamment importante pour permettre d'avoir une certaine épaisseur de particules. La seconde solution est de représenter une particule réelle par un ensemble de particules numériques, choix pour lequel la solution de l'épaisseur ne se pose plus. Dans les deux cas, il faut alors calibrer les lois d'interaction pour tenter de reproduire la rhéologie de l'interface, ou à défaut une certaine phénoménologie [4], en intégrant les interactions entre particules et leur comportement (élastique, plastique, visqueux,...).

2.2.2 Frottement macroscopique et cohésion

Etudier les écoulements de troisième corps solides s'apparente à étudier la rhéologie de milieux granulaires dans des conditions de cisaillement plan. Cette cohésion peut traduire différents aspects physiques : plasticité, viscosité, ... Dans le cadre présenté ici, il ne nous semble pas émettre d'hypothèses farfelues en reliant la cohésion entre particules à la cohésion interne (au sens actions/réactions physico-chimiques) du troisième corps. Ainsi en fonction de sa valeur, il est intéressant de regarder l'évolution de grandeurs moyennes telle que le frottement global ou macroscopique, noté μ, vu comme le ratio entre la somme des forces tangentielles mesurées à la paroi inférieure et la force normale appliquée sur la paroi supérieure, ou encore l'évolution des profils de vitesses au travers de l'épaisseurs de la couche cisaillée, nous permettant de voir la mobilisation de la couche (en terme de déformation et localisation d'effort).

De manière étonnante, on trouve dans la littérature de nombreux travaux centrés sur la caractérisation des écoulements pulvérulents (dit "sec" dans le vocabulaire granulaire) mais relativement peu sur les écoulements cohésifs. Parmi les résultats disponibles, on trouve des simulations d'écoulement 2D avec les travaux de Rognon et al [136] utilisant une approche DEM explicite et des simulations d'écoulement 3D avec les travaux Iordanoff [72] et Richard [132] qui utilisent eux aussi une approche DEM explicite mais basée sur un autre schéma d'intégration (un schéma de Gears dans le premier cas [4] et un schéma de Verlet en vitesse dans le second cas [155, 156]). Ces deux schémas sont utilisés classiquement dans les approches dynamique moléculaire dont dérivent ces méthodes car elles offrent la garantie d'avoir un schéma conservatif. Dans les deux cas la loi d'interaction utilisée présente les même propriétés, à savoir l'utilisation d'une raideur au contact, d'un terme visqueux lié à la vitesse relative entre grains et une cohésion indépendante des termes précédents. Ces résultats sont comparés à des résultats issus de travaux de recherche encore non publiés utilisant un schéma d'intégration implicite basé sur une θ-méthode (schéma inconditionnellement stable et conservait pour $\theta = 0.5$) et une loi de contact unilatéral cohésive afin de ne pas introduire de paramètre lié à la raideur au contact, les deux éléments nous permettant d'avoir des pas de temps dans les simulations plus grand qu'avec les méthodes précédentes.

4. Dans la notion de rhéologie, on sous entend une loi établie alors que dans la notion de phénoménologie fait référence à une démarche incrémentale dans la détermination d'une loi.

Afin de les comparer, l'évolution de μ est tracée en fonction du nombre sans dimension η baptisé intensité de cohésion [136]. Ce paramètre peut s'écrire :

$$\eta = \frac{\gamma S}{Fd}, \tag{2.1}$$

où d désigne le diamètre moyen des particules, γ la force de cohésion locale, F la force normale appliquée sur l'échantillon et S la surface totale de l'échantillon. Il représente donc le ratio entre la pression moyenne locale et la pression globale exercée sur l'échantillon. La figure 2.1 montrent donc l'évolution du frottement macroscopique μ en fonction de l'intensité de cohésion η.

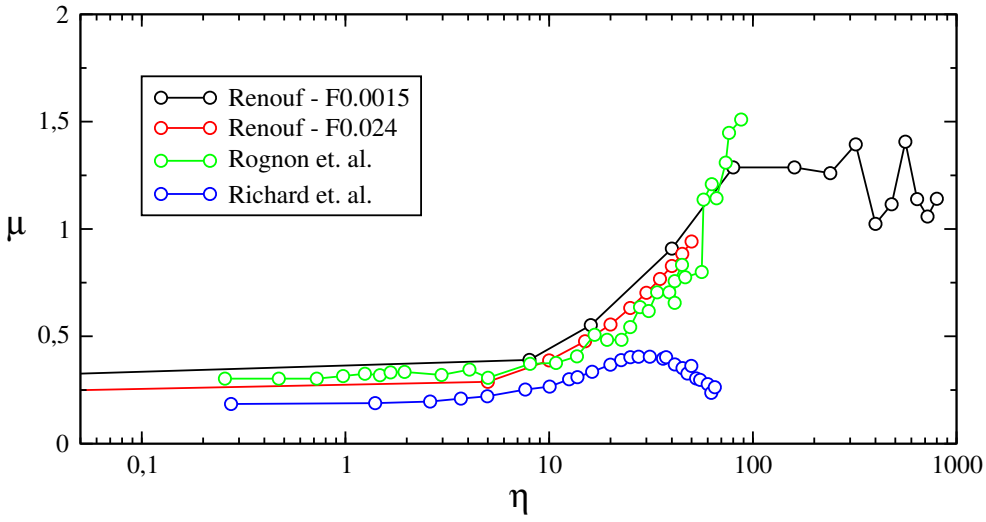


Figure 2.1 – *Comparaison de l'évolution du frottement macroscopique en fonction de l'intensité de cohésion avec différentes approches numériques.*

Ces séries de simulations exhibent différents résultats. Si l'on compare l'ensemble des modèles, on trouve un comportement quasi équivalent entre les modèles implicites 2D et 3D et les résultats de Rognon et al [136] : le frottement macroscopique augmente avec l'augmentation de l'intensité de cohésion. Pour des valeurs de η inférieure à 10 (ce qui correspond déjà à de très forte intensité de cohésion), les allures sont équivalentes. Grâce aux simulations implicites (2D et 3D) permettant d'étendre les valeurs d'intensité de cohésion, on s'aperçoit qu'il existent une valeur seuil (qui semble indépendante de la dimension) à partir de laquelle on obtient une saturation de la valeur du frottement macroscopique, avec toutefois de fortes oscillations.

Si l'on compare maintenant les modèles explicites basés sur des modèles équivalents, on s'aperçoit qu'avec le modèle 2D, μ croît avec l'augmentation de η alors qu'avec le modèle 3D, on assiste à une croissance puis à une décroissance de μ avec l'augmentation de η.

Pour bien comprendre cette transition de μ et enrichir la discussion, il est intéressant de combiner une partie de ces résultats aux résultats obtenus par H.-P. Cao dans ses travaux de thèse [29] concernant l'impact de la loi d'interaction locale sur le comportement macroscopique d'écoulements tridimensionnels. En particulier, il a regardé le rôle que pouvait avoir la partie élastique présente au niveau des interactions (au travers de

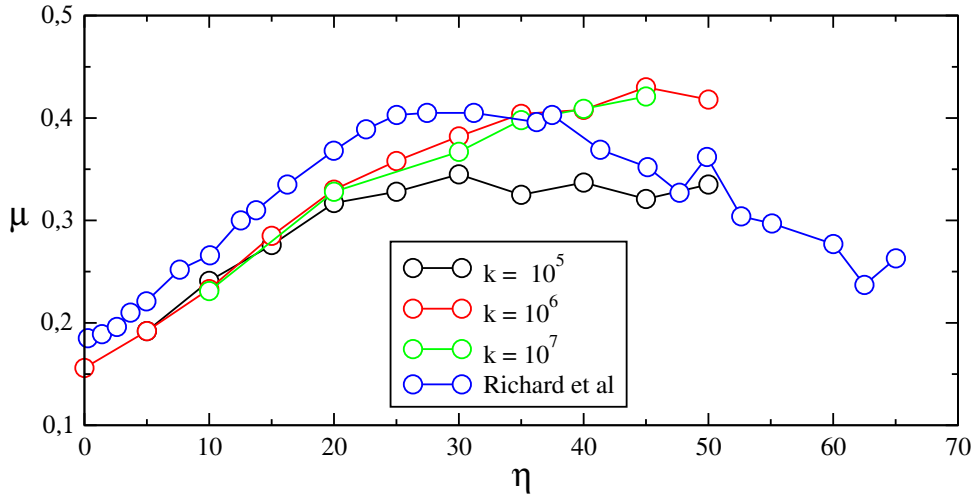


Figure 2.2 – *Comparaison de l'évolution du frottement macroscopique en fonction de l'intensité de cohésion pour des écoulements tridimensionnels réalisés avec différentes approches numériques utilisant une raideur au contact.*

la raideur de contact k) sur le comportement macroscopique ; la géométrie utilisée est identique à celle utilisée par Richard dans ses travaux de thèse. Il trouve ainsi le même niveau de frottement que dans les travaux de Richard, mais il montre aussi, comme présenté par la Figure 2.2, qu'il existe une valeur critique pour la raideur au contact k à partir de laquelle la courbe $\mu = f(\eta)$ reste inchangée. Dans la gamme de valeurs testées, il n'observe pas de décroissance mais plutôt un plateau. On peut alors supposer que cette différence provienne du terme de dissipation présent dans le modèle utilisé par Richard, mais aujourd'hui aucune n'étude n'a été réalisé à ce jour sur ce point particulier. Pour avoir une vision propre de l'impact des modèles locaux sur le comportement global, il faudrait finaliser ce travail pour pouvoir croiser les résultats d'une manière plus sereine.

En regardant ce dernier point avec un oeil de tribologue, on peut souligner le fait qu'il est possible d'obtenir le même frottement macroscopique en ayant pourtant deux rhéologies différentes : ceci illustre le fait qu'une mesure de frottement aussi bien numérique qu'expérimentale réalisée hors du contact ne permet pas de remonter à la rhéologie du troisième corps.

Ces résultats soulignent également l'influence de la dimension d'étude et du choix de la loi d'interaction locale. Si le "frottement" doit être une donnée de sortie d'un modèle micro, il faut comprendre quels sont les paramètres pouvant jouer un rôle important. Si le choix de la dimension n'est pratiquement pas discutable (on ne vit pas dans un plan), le choix du modèle d'interaction reste important.

Les modèles discrets de troisième corps ont permis de revisiter et d'éclairer la notion de troisième corps [53, 73]. Cependant, à ce jour il n'existe pas encore de loi de comportement macroscopique permettant de caractériser correctement ces milieux mais des travaux récent dans ce domaine devrait permettre d'offrir de nouvelles pistes de réflexion [10], où les auteurs décomposent le frottement macroscopique comme une fonction de trois termes liés à différents effets (cohésion, contact et frottement local). La question a élucidée reste maintenant de savoir si ces paramètres sont décorélés ou si

des termes de couplages interviennent.

Enfin il ne faut pas voir les modèles discrets uniquement pour représenter des troisièmes corps "conventionnels" mais aussi pour des troisièmes corps plus "exotiques" (tribologie des propergols solides [37,38], des graisses [123] ou des tissus de frottement [16]) car leur simple enrichissement en terme de géométrie ou de loi d'interaction permet aussi de proposer des réflexions et porter un nouveau regard sur des problèmes souvent laissés sans solution ou, pire, avec une multitude de solutions, fonction du "dogme" d'appartenance.

2.3 Enrichissement multi-physiques

2.3.1 Modèles multi-physiques discrets : un cadre général ?

Modéliser le comportement d'une interface tribologique d'un point de vue purement mécanique nous met rapidement face à différents problèmes. D'un point de vue macroscopique, un contact (au sens interface tribologique) peut-être soumis à des sollicitations autres que mécanique : de forts gradients thermiques, passage de courant électrique, variation climatique, etc. Il faut donc pouvoir traduire l'impact de ce type de sollicitations au sein de l'interface et donc prendre en compte les physiques sous-jacentes.

Si l'on regarde d'un point de vue plus local, l'un des rôles du troisième corps est de dissiper une partie de l'énergie amené au système. Les sources de dissipations peuvent alors être de natures différentes conduisant à des transformations de surface (ou superficielle) [7,28] ou à la génération de fissures ou autres défauts [144]. Il peut également être à la source de la génération de chaleur. Cette dernière est d'autant plus importante que le contact, toujours soumis aux mêmes sollicitations tribologiques, peut être le siège de nombreuses réactions chimiques (par exemple l'oxydation [23, 120]), réactions souvent fortement dépendantes de la température ambiante [80].

Les approches discrètes usuelles (comprendre uniquement mécanique) doivent donc être enrichies afin de pouvoir prendre en compte les aspects multi-physiques mis en jeu. Ces modèles doivent être développés de façon rigoureuse, afin de ne pas induire de nouveau biais numériques, et validés si possible par des résultats expérimentaux, car les modèles sont attendus pour comprendre. Il faut toutefois rester conscient des limites de ces nouveaux modèles et ne pas extrapoler les résultats obtenus dans des contextes ne satisfaisant plus les hypothèses mises en jeu initialement.

Un premier moyen de véhiculer une autre physique dans un milieu discret est de s'appuyer sur le réseau de contact du milieu. Dans un système discret dense, ce dernier peut-être vu comme le dual de la collection de particules, comme peut l'être par exemple la triangulation de Delaunay pour un pavage de Voronoï. Dans un système discret, en l'absence de déformation des grains, c'est ce réseau qui traduit l'état mécanique du système [121] au travers de grandeurs moyennes associées tel que le tenseur de contrainte équivalent [11] ou encore le tenseur de texture [150] servant à traduire l'anisotropie du milieu. Si l'on s'intéresse à des transferts de quantités au travers du milieu discret dont la nature est autre que mécanique (flux thermique, intensité électrique, potentiel chimique), c'est donc naturellement que l'on a envie d'associer ce réseau sous-jacent à la physique

impliquée. Au travers de cette notion de réseau, on s'aperçoit alors qu'il est possible de véhiculer la diffusion de n'importe quel potentiel chimique si tant est que l'on puisse traduire son impact et sa relation avec un milieu discret. De plus, en chaque noeud, des termes sources peuvent être ajoutés, aussi bien pour traduire des conditions limites que pour représenter à un instant donné la génération d'une quantité donné (chaleur, réaction chimique, ...).

Cependant les phénomènes physiques pouvant siéger dans un contact n'ont pas tous la même loi d'évolution. Si certains peuvent être écrits de la même façon (diffusion), les nombreuses non-linéarités des modèles conduisent à développer un nouveau modèle pour une nouvelle physique. De plus la prise en compte de certain phénomènes peut demander des enrichissements qu'une analogie via le réseau de contact seul n'est pas capable de traduire.

De nombreux travaux de recherches ont été mis en place avec pour objectif cet enrichissement multi-physique. La Section 2.3.2 présente les développements liés aux aspects électriques de milieux purement résistifs ou pouvant s'oxyder [43,128], la Section 2.3.3 focalise sur les aspects thermiques en particulier les phénomènes de conduction et génération de chaleur [125,132,133], tandis que la Section 2.3.4 clôt la présentation des modèles multi-physiques en présentant les développement liés à la physico-chimiques [35,127].

2.3.2 Linéarités et non linéarités électriques

2.3.2.1 Pourquoi étudier le comportement électrique d'un troisième corps ?

La modélisation mécano-électrique d'un contact peut sembler exotique car quand on parle d'interface tribologique on pense plutôt aux phénomènes thermique et ou physico-chimique. Toutefois le comportement électrique des interfaces tribologiques est d'un grand intérêt dans de nombreuses applications comme le contact roue-rail [43], le contact balais/collecteurs dans les démarreurs automobiles [151], le contact dans les engrenages des éoliennes [68] ou encore l'analyse des défauts dans les roulements [26]. Dans ces différentes applications se pose alors la question de l'évolution de la résistance électrique au contact dans des conditions de cisaillement et quelle va être l'influence de la rhéologie du troisième corps sur le comportement électrique du contact.

Répondre à cette question demande alors de mettre en place un modèle capable de coupler à la fois l'évolution dynamique d'un milieu discontinu et les phénomènes électriques le parcourant. La littérature ne proposant pas de tel modèle, il nous a fallut en bâtir un en nous appuyant sur le cadre mécanique.

2.3.2.2 Création d'un modèle électro-mécanique discret

Pour développer ce modèle mécano-électrique discret, nous allons nous appuyer sur l'analogie du réseau de contacts d'un milieu discret dense (c.f. Fig. 2.3) avec un réseau électrique linéaire [5].

5. Un réseau électrique linéaire est un ensemble de dipôles linéaires, reliés par des conducteurs de résistance négligeable. Ce réseau est constitué de n_c branches connectées par n_b noeuds et formant n_m mailles. Un noeud apparaît donc comme un point de jonction de plusieurs conducteurs, une branche est

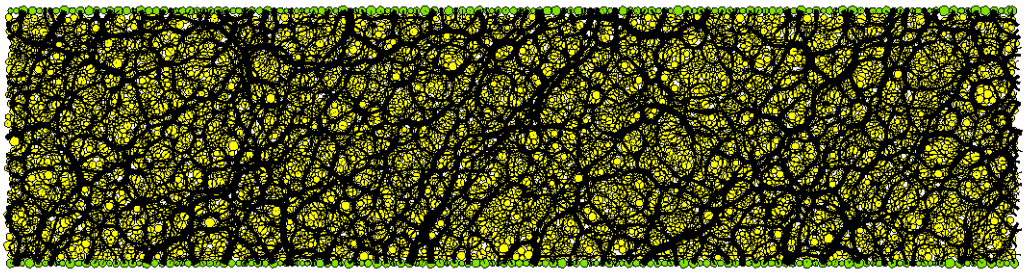


Figure 2.3 – *Analogie entre le réseau de contact d'un milieu discret et un réseau de résistance électrique.*

Les noeuds de ce réseau sont alors associés aux centres de masse des particules et de n_c branches (contacts) connectant les différents noeuds, le tout formant n_m mailles. Pour déterminer la résistance ou la conductance globale de l'échantillon, il faut alors définir les conductances locales de chaque branches ainsi que la cohérence globale (au sens électrique) entre les différents éléments du réseau en s'appuyant sur les lois de Kirchhoff.

Via cette première analogie, qui consiste finalement à voir la conductance d'une branche comme une série de conductance, la conductance d'une branche, notée C_α, est donnée par :

$$\frac{1}{C_\alpha} = \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_j} + \frac{1}{C_m}, \tag{2.2}$$

où C_i et C_j représentent les conductances respectives des particules i et j en contact et C_m la conductance de contact reliée aux efforts de contact. La construction du problème électrique global impliquant l'ensemble des branches du système se fait alors en utilisant à la fois la loi des noeuds et la loi d'Ohm prenant en compte l'information locale, conduisant à la résolution d'un problème linéaire où l'on cherche à déterminer le potentiel électrique de chaque particule, noté $\mathbf{V}$:

$$\mathbb{N}\mathbb{C}\mathbb{N}^T\mathbf{V} = -\mathbf{I}_0, \tag{2.3}$$

où la matrice $\mathbb{N}$ représente la matrice de voisinage ou de connectivité entre les différents noeuds du réseau. La matrice $\mathbb{C}$ est appelée matrice de conductance du système et contient les conductances de chaque branche du réseau.

2.3.2.3 Validations électriques

Grace au modèle que nous avons développé, il est possible de retrouver d'un point de vue phénoménologique, les relations classiques qu'il existe entre la résistance d'un échantillon et sa hauteur ou sa longueur (cf. Figure 2.4) : la résistance évolue linéairement avec l'augmentation de hauteur (h) ainsi qu'avec l'inverse de la longueur (1/L).

une portion de circuit entre deux noeuds et une maille est un parcours *fermé*, constitué de branches et ne passant qu'une seule fois par un noeud donné

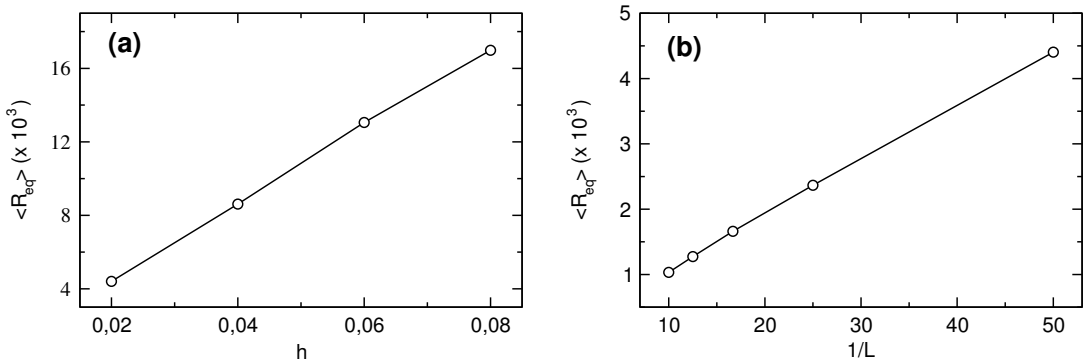


Figure 2.4 – *Mesure de la résistance équivalente d'un milieu discret en fonction (a) de sa hauteur h et (b) de sa longueur L.*

Cependant ce type de modèle, purement résistif, néglige l'état de surface des particules, surface recouverte dans le cas de matériau métallique par une couche d'oxyde. La présence de cette couche d'oxyde, sensible à la puissance électrique locale, conduit à une hétérogénéité électrique de l'échantillon considéré. De plus, lorsque le milieu est soumis à du cisaillement, la disposition des branches définissant le réseau évolue, conduisant à changer l'état de surface électrique des particules. La prise en compte de ce dernier point est primordial pour reproduire par exemple le comportement non linéaire d'une poudre métallique ou bien même d'une colonne de billes.

Ainsi, en s'appuyant sur le modèle précédent, il est possible de compléter celui-ci par de nouvelles hypothèses afin de prendre en compte les phénomènes évoqués.

- **Hyp. 1** - Pour un milieu discontinu, on considère que l'oxyde est présent de façon aléatoire dans l'échantillon et qu'il possède une couche d'épaisseur variable. Physiquement les couches d'oxyde considérées sont de l'ordre du nanomètre voire inférieur. Cette grandeur est largement inférieure au diamètre moyen de nos particules. On considère donc que *l'oxyde va intervenir uniquement aux points de contacts*.
- **Hyp. 2** - La couche d'oxyde possède une résistance électrique très élevée (on peut avoir un rapport allant de 10 à 1 000 entre la résistance de la couche d'oxyde et celle des particules). Ainsi en notant C_m la conductance moyenne d'un échantillon, nous introduisons le paramètre p_o, nous permettant d'exprimer la conductance de la couche d'oxyde, notée C_o, en fonction de la conductance moyenne. Autrement dit : $C_o = p_o \times C_m$.
- **Hyp. 3** - Chaque couche d'oxyde possède un seuil de claquage, noté S_c. Lorsque la puissance électrique d'une branche du réseau dépasse ce seuil, alors la couche d'oxyde claque, et seule les conductances des particules et du contact nous permettent de déterminer la conductance totale locale.
- **Hyp. 4** - Les mouvements inter-granulaire, même minimes, créent des variations dans les forces de contacts, et permettent à certains contacts de disparaître ou d'apparaître entre deux pas de temps. Il est donc important de garder une histoire de l'oxydation des contacts. Si l'instant t à la résolution du problème électrique un contact est oxydé (resp. non oxydé), celui devra être considéré comme oxydé (resp. non oxydé) à l'initialisation du problème électrique à l'instant $t + dt$. Tout

contact qui a perdu sa couche d'oxyde ne peut la récupérer sans une intervention mécanique. Tout nouveau contact détecté part avec le statut oxydé.

L'intégration de toutes ces hypothèses dans le modèle précédent revient à résoudre un algorithme de point fixe i.e. à résoudre une succession de problème linéaire (2.3) pour une distribution d'oxyde donnée ; la convergence étant assurée lorsque la distribution d'oxyde n'évolue plus.

Pour valider le comportement non-linéaire nous avons procédé à une simulation reproduisant les expériences électriques faites dans [54, 55] consistant à soumettre une poudre métallique à un courant fonction du temps (croissant puis décroissant) et de regarder la la courbe tension-courant au court de l'expérience. Le dispositif expérimental est reproduit numériquement et le résultat de la simulation est donné par la figure 2.5.

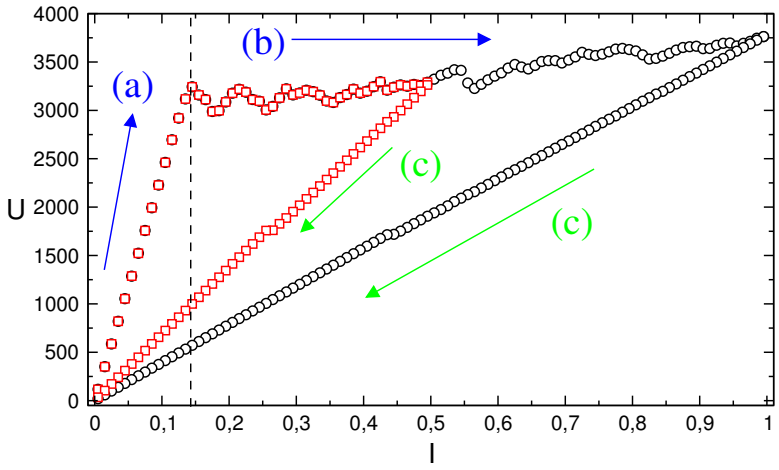


Figure 2.5 – *Comportement non linéaire de la courbe U-I lors de la mise en charge et la décharge du courant.*

On retrouve les résultats expérimentaux proposés dans [54, 55] qui montrent que la courbe courant-tension est décomposée en trois étapes. Lors de l'étape (a) (cf. figure 2.5), nous pouvons observer le comportement ohmique de l'échantillon (de résistance Ra). A partir d'une valeur de courant seuil, noté Ic (égal à $0.15\ A$ dans notre simulation), les couches d'oxyde commencent à "claquer". Plus l'intensité du courant augmente plus le nombre de couches d'oxyde qui claquent (au niveau de chaque contact) augmente. Ceci à pour conséquence le plateau observé lors de l'étape (b) : la tension atteint une valeur de saturation. Lorsque l'on diminue par la suite l'intensité du courant, on va redescendre suivant un comportement ohmique, de résistance Rc plus faible que Ra. Notons que plus on tend vers des valeurs d'intensité importantes lors de la phase de chargement, moins la résistance ohmique du retour sera grande, l'augmentation de l'intensité conduisant a faire claquer une à une les couches d'oxyde. Ce résultat corrobore parfaitement avec les résultats expérimentaux faits sur des échantillons statiques [54, 55]

2.3.2.4 Retour à des considérations tribologiques

Une fois le modèle validé avec des résultats disponibles dans la littérature, nous avons pu l'utiliser dans des conditions "tribologiques". Pour cela, nous sommes revenus

au modèle utilisé classiquement et réalisé des simulations de cisaillement plan pour des différentes vitesses. Les vitesses de cisaillement testées ont été choisies pour correspondre à des vitesses de cisaillement observées en contact roue-rail [142, 147]. Les résultats sont représentés sur la figure 2.6.

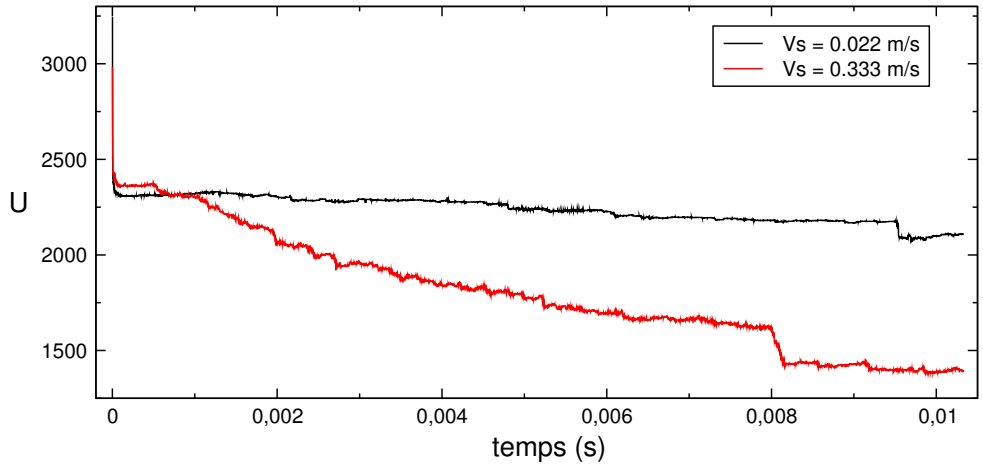


Figure 2.6 – *Evolution de la tension pour deux vitesses de cisaillement.*

L'augmentation de la vitesse de cisaillement a pour conséquence de faire chuter la résistance équivalente. Les courbes d'évolution se décomposent en deux phases. Durant la première, très courte en début de simulation, on observe un nombre important de claquages électriques correspondant à une décroissance quasi verticale de la résistance équivalente en tout début de simulation. Dans la seconde phase, correspondant au reste de la simulation, on observe des claquages mécaniques tout au long du processus de cisaillement. Pour de faible vitesse de cisaillement, la décroissance est très faible et quasi-constante avec toutefois un petit saut en fin de simulation. Pour de forte vitesse de cisaillement, la décroissante est beaucoup plus prononcée et peut être décomposée en deux parties : une première partie, t $\in [5.10^4, 8.10^3]$, dans laquelle la résistance décroît fortement (chute d'environ 30%) et une seconde, $t \in [8.10^3, 1.10^2]$, où après un saut d'une centaine de Ohms, la décroissance devient très faible.

D'une manière générale, l'évolution de la tension aux bornes de l'échantillon tend à diminuer avec le cisaillement. Contrairement aux résultats obtenus avec le modèle linéaire, ces observations concordent avec les observations globales faites en dynamique ferroviaire. Ces dernières ne permettant toutefois pas d'accéder aux informations locales, l'utilisation du modèle que nous avons développé semble donc incontournable pour mieux appréhender les problèmes de résistances électriques dynamiques.

2.3.3 Conduction et génération de chaleur au coeur d'un contact

2.3.3.1 Contexte

Contrairement au modèle électrique, évoquer les aspects thermiques lorsque l'on parle de contact frottant est beaucoup plus naturel (il suffit de se frotter les mains

pour s'en convaincre). La motivation première dans le développement d'un modèle discret thermo-mécanique concerne l'incompréhension des phénomènes thermiques dans les contacts frottants, que se soit par approches expérimentales, impossible à mener sans perturber le contact, ou par modélisations "prédictives", se fondant sur des hypothèses réductrices en terme de diffusion et de génération de chaleur. Dans ces derniers le coefficient de frottement utilisé (au même titre que les coefficients de partage) masque complètement l'ensemble des phénomènes pouvant décrire de manière plus pertinente la thermique locale du contact. Il semble donc important, pour ne pas dire primordial, de mettre en place un tel modèle.

C'est bien dans ce sens qu'ont été menés les travaux de thèse de D. Richard [132]. En s'appuyant sur les travaux disponibles dans la littérature (en particulier ceux de Vargas et McCarthy [153, 154]) et en intégrant la notion de génération de chaleur locale, il s'intéresse à la conduction et la génération de chaleur dans un troisième corps cisaillé. L'idée principale est de revisiter les différents modèles de résistance thermique au contact (en considérant le contact parfait [25, 41, 74, 82], imparfait [84], avec prise en compte de l'usure [114] ou encore en intégrant un troisième corps au contact [138]) en essayant d'apporter un certain nombre d'explications sur l'ensemble des phénomènes microscopiques qui gouvernent la thermique du contact frottant sec en donnant au frottement non plus le rôle de paramètre d'entrée mais celui de paramètre de sortie.

2.3.3.2 Les grandes lignes du modèle

La quantité de chaleur échangée par conduction par la particule i, notée Q_i^c, est la somme des échanges de chaleur avec l'ensemble des particules voisines en contact. Ainsi le terme Q_i^c peut s'écrire comme :

$$Q_i^c = \sum_{i=1}^{N} Q_{ij}^c, \tag{2.4}$$

avec

$$Q_{ij}^c = H_{ij}^c (T_i - T_j), \tag{2.5}$$

où T désigne la température d'une particule et H_{ij}^c représente la conductance de contact, fonction des propriétés matériaux et des efforts locaux [125]. L'écriture de l'équation (2.9) repose alors sur deux hypothèses.

La première hypothèse suppose que lors de la résolution du problème thermique, l'ensemble des contacts de la particule i voit la même température, sous entendu que la température de la particule varie faiblement d'un contact à l'autre. Cette approximation reste suffisante pour des pas de temps petits, mais il est toutefois possible, pour des pas de temps plus grand ou pour une précision plus grande, de prendre en compte un terme correctif en utilisant une capacité thermique [145]. Cette hypothèse se justifie en regardant la valeur du nombre de Biot B_i qui représente le rapport entre la résistance thermique de conduction au contact et la résistance thermique de convection au travers une particule. Cette relation peut s'écrire :

$$B_i = \frac{H_c.R}{k_s A} = \frac{2}{\pi}(\frac{a}{R}), \tag{2.6}$$

avec R le rayon de la particule, A son aire et a le rayon de contact. Cette hypothèse, indépendante des propriétés matériaux, s'avère en général vérifiée dans les simulation de collections de corps rigides puisque l'aire de contact est très petite devant le rayon d'une particule.

La seconde hypothèse concerne l'écriture de l'équation (2.5). Elle suppose que la température d'une particule se propage suffisamment lentement pour ne perturber que son voisinage au contact durant un pas de temps, autrement dit que la variation sur un pas de temps de la température de la particule i est bien inférieure à la différence de température de la particule i et des particules de son premier voisinage :

$$dT_i << T_j - T_i. \tag{2.7}$$

Si l'on considère la conductance de particule élastique, ceci est équivalent à :

$$\frac{H_c dt}{\rho_i c_i V_i} << 1, \tag{2.8}$$

où l'inégalité (2.8) fournie une condition sur le pas de temps fonction des propriétés des matériaux. En pratique cette condition s'avère beaucoup moins restrictive que la condition sur le pas de temps mécanique.

Comme pour la quantité de chaleur échangée par conduction, la quantité de chaleur Q_i^s est la somme des quantités de chaleur créées localement (du au mouvement relatif de la particule i vis à vis des particules de son voisinage) :

$$Q_i^s = \sum_{j=1}^{N_i} Q_{ij}^s, \tag{2.9}$$

avec

$$Q_{ij}^s = \frac{1}{2}\mathbf{r}^{ij}\dot{\tilde{\mathbf{u}}}^{ij}. \tag{2.10}$$

Cette formule, proposée par Champelovier et al [35], permet de prendre en compte aussi bien les variations normales que tangentielles. Cette approche intègre alors les différents modèles de génération de chaleur que l'on peut trouver dans la littérature, utilisant une loi régulière pour gérer le contact entre deux sphères (cf. les travaux de D. Richard [133]) ou encore une loi de contact frottant unilatéral [111]. Concernant les hypothèses à respecter, les mêmes critères que dans le cas de la conduction s'appliquent à la génération locale de chaleur. Ainsi la première hypothèse reste inchangée et seule la seconde est à modifier. En effet même si l'inégalité (2.7) doit toujours être vérifiée, dans ce cas elle est équivalente à :

$$\frac{\mathbf{r}^{ij}\dot{\tilde{\mathbf{u}}}^{ij} dt}{\rho_i c_i V_i} << T_i - T_j. \tag{2.11}$$

Si il est difficile de trouver une expression analytique à l'inégalité [2.11], en pratique elle est toujours vérifiée.

Ces différents flux sont ensuite introduits dans un schéma d'évolution permettant de décrire l'évolution de la température d'un élément au court du temps. Ce schéma d'évolution n'est pas nécessairement identique à celui utilisé en mécanique. Dans ce cas, il faut être capable de projeter les valeurs associées aux problèmes thermiques sur les points d'intégration temporel utilisé en mécanique. Dans notre approche, les schémas d'évolution mécanique et thermique sont identiques (pour rappel une θ-méthode), nous affranchissant ainsi de ce type de problème.

2.3.3.3 Résistance thermique au contact et coefficients de partage

Grâce au modèle thermo-mécanique proposé, il est désormais possible de faire une analyse thermique des écoulements présentés dans la Section 2.2.2. Afin de ne pas être dans un système adiabatique, des conditions limites thermiques ont été utilisées afin de permettre à une certaine quantité de chaleur d'être évacuée du contact [125]. Ce modèle est alors équivalent à faire diffuser la chaleur dans un volume donné se situant au dessus (et en dessous) de l'échantillon cisaillé.

La figure 2.8 propose de visualiser les profils de température au travers de l'épaisseur d'un échantillon cisaillé, obtenus pour différentes valeurs de cohésion. En fonction de la valeur de cohésion (et pour une raideur et dissipation locale donnée), D. Richard identifie quatre régimes correspondant à différentes valeurs de η : fluide ($\eta < 1$), semi-fluide ($\eta \in [1, 20]$), elasto-plastique ($\eta \in [20, 50]$) et élastique ($\eta > 50$). Pour chaque régime, il observe des comportements thermiques différents en terme de profil, de valeur maximale de température, de localisation de cette valeur maximale et des valeurs aux parois.

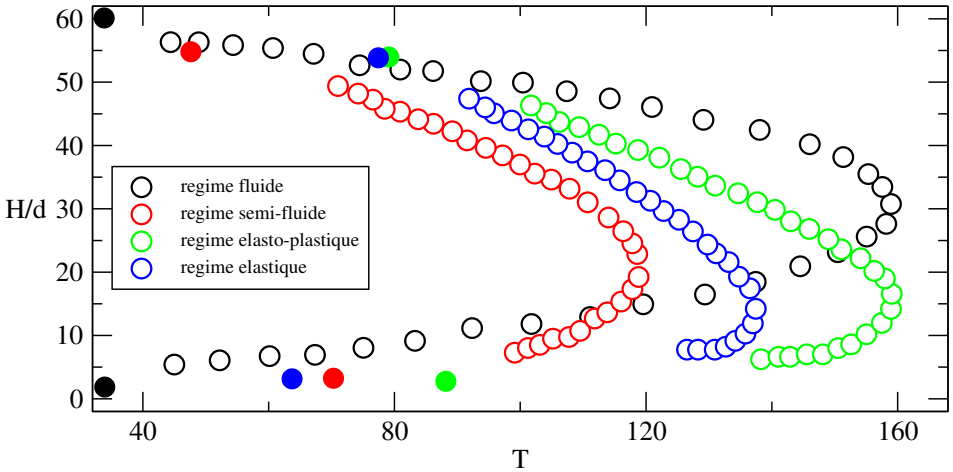


Figure 2.7 – *Profil de température au travers de l'épaisseur d'un échantillon cisaillé calculé pour différentes valeurs de cohésion. Les points pleins correspondent aux températures des parois supérieure et inférieure.*

Quelque soit le régime, la valeur maximale de température est située au sein du troisième corps. La hauteur dépend du type de régime est semble décroitre avec l'aug-

type de régime	Q_{1c}/Q_μ
Fluide	0.74
Semi-fluide	0.60
Elasto-plastique	0.60
Elastique	0.65

Table 2.1 – *Rapport Q_{1c}/Q_μ en fonction des différents régimes d'écoulement.*

mentation de η. Cette dépendance est liée au fait que suivant le régime, la mobilisation du milieu n'est pas la même, conduisant à des gradients de vitesse locaux différents d'un régime à l'autre. Seul le profil du régime fluide est symétrique, entrainant une égalité des températures des parois inférieure et supérieure (une des hypothèses du modèle de Blok [24, 25]). Pour les autres régimes, on obtient des réponses asymétriques pour lesquels la source principale de chaleur se rapproche de la paroi cisaillante du à l'accommodation des vitesses ne se produisant pas nécessairement sur toute la hauteur de l'échantillon. Pour les régimes semi-fluide et élasto-plastique, la température de la paroi inférieure est plus importante que celle de la paroi supérieure (avec une différence diminuant avec l'intensité de cohésion) tandis que pour le régime élastique, on observe le phénomène inverse. Ceci s'explique par le temps de contact entre l'échantillon et la paroi cisaillante qui diminue avec l'augmentation de η. Ainsi, les flux de chaleur ont de moins en moins le temps de passer de l'échantillon vers la paroi inférieure, privilégiant ainsi le passage vers la paroi supérieure.

La cohésion du troisième corps joue donc un rôle important sur les lieux et profils de dissipation lors du cisaillement. Pour compléter ces observations, il est intéressant de calculer le rapport entre la puissance totale liée au cisaillement de l'échantillon, notée Q_μ, fonction de la vitesse de cisaillement V, de la force appliquée F et du frottement macroscopique mesuré μ (i.e. $Q_\mu = \mu F V$) et la part transférée aux parois, notée Q_{1c}. Le tableau 4.1 synthétise les valeurs des différents rapports.

La puissance mise en jeu par frottement est transmise aux parois en moyenne à hauteur de 60%. Le reste de cette chaleur reste alors piégée dans le troisième corps et participe ainsi à son propre échauffement. Si l'on s'en réfère aux modèles de la littérature, ceci revient à rajouter un troisième coefficient de partage pour les modèles de type Blok-Jaeger [74] ou un quatrième pour les modèles de type Olesiak [114]. Ceci souligne également le fait que les coefficients de partage dépendent fortement des propriétés locales du troisième corps (ici principalement au travers de la cohésion) alors que classiquement ils ne dépendent que des premiers.

2.3.3.4 Vers des modèles prédictifs (?)

Les travaux de thèse de D. Richard [132] avait pour but de porter un nouveau regard sur les bilans d'énergie dans un contact. Cependant, l'étude sans dimension faite dans la thèse donne à l'étude un caractère phénoménologique, rendant les résultats non généralisables à tout type de contact, surtout à la vue de des résultats présentés dans la section 2.2.2, dédiée à la rhéologie des interfaces, montrant l'influence de la loi

d'interaction sur les données macroscopiques.

Pour faire un pas vers des modèles plus réalistes, différents travaux ont été entrepris et ont conduits à la thèse de J. Rivière [134]. Dans une partie de cette thèse, une réflexion plus poussée est entreprise par rapport à la thèse de D. Richard, en s'affranchissant notamment des modèles utilisant une raideur au contact (favorisant la génération de chaleur [132]) et regardant l'influence des sollicitations (pression et vitesse) sur les écoulements.

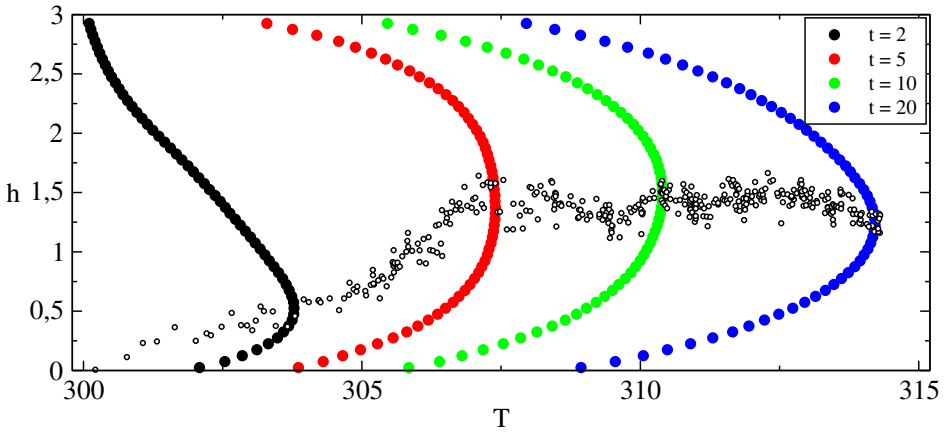


Figure 2.8 – *Profil de température au travers de l'épaisseur d'un échantillon cisaillé calculé à quatre instants différents (t = 2, 5, 10 et 20 ms) superposé à la position de la valeur maximale de la température pour chaque valeur de T (nuage de points).*

Pour illustrer une partie de cette étude, que l'on pourra retrouver en détail dans le manuscrit de thèse de Rivière, revenons sur la notion de temps caractéristique dans les écoulements. La figure 2.8 permet d'observer différents profils de température au travers de l'épaisseur d'un échantillon cohésif cisaillé, calculé à quatre instants différents de la simulation (t = 2, 5, 10 et 20 ms). A ces profils on superpose un nuage de points où chaque point correspond à la hauteur du maximal de température.

Pour la cohésion et le couple (P,V) utilisés, l'intensité de cohésion est de 1.5 valeur correspondant à un régime semi-fluide. Si l'on trace le profil de température à $t = 2ms$, le profil obtenu correspond à celui observé par Richard dans sa thèse pour le même type de régime. Toutefois, si l'on poursuit la simulation sur un temps plus long, on s'aperçoit que la localisation ce cette valeur maximale migre vers le centre de l'échantillon comme pour un régime fluide.

Cette observation soulève alors plusieurs interrogations liées notamment à l'existence de la notion de "régime". En effet, il semble que pour un temps suffisamment long, le profil d'un écoulement cohésif atteint celui d'un écoulement de type Couette (profil de vitesse linéaire en fonction de l'épaisseur de l'échantillon). Est-ce là l'effet d'une loi d'interaction purement plastique ? Est ce que la raideur au contact qui permet finalement d'obtenir ce type de régime ? Ces questions sont ici sans réponse, mais ouvre des pistes de recherche concernant la rhéologie des milieux discrets.

La réponse est d'autant plus importante que c'est elle qui va également piloter les mécanismes de dissipations. L'intégration d'un temps caractéristique, nécessaire à une

stabilisation devra peut-être introduite, lorsque ce type de modèle sera utilisé à des visés plus applicatives ; nous reviendrons à la fin du chapitre sur les perspectives directes à ces travaux.

2.3.4 Physico-chimique

2.3.4.1 Contexte

La physico-chimie est le troisième aspects multi-physique qu'il nous a semblé important d'intégrer dans la modélisation des interfaces tribologiques. La physico-chimie du troisième corps, sensible à l'environnement proche du contact ainsi qu'aux sollicitations auxquelles il est soumis, à une forte incidence sur sa rhéologie [42,83]. Cependant, comprendre quels sont les mécanismes qui sont à la source des changements de rhéologie, demande de comprendre les différentes compétitions présentes au coeur d'un contact. C'est pourquoi, la physico-chimie est un point qui nous semble important de prendre en compte lors de la modélisation d'interface tribologique (probablement le plus important). Cependant, il faut souligner que les aspects physico-chimiques discutés ici reste une vision de mécanicien, même si de nombreuses discussions avec des chimistes ont permis la développement du modèle. Le vocabulaire utilisé ici n'est certainement pas le vocabulaire conventionnel pour décrire les phénomènes physico-chimiques, mais plutôt une interprétation/traduction personnelle permettant de faire le lien entre chimistes et mécaniciens.

La notion de physico-chimie à déjà été introduite dans le modèle mécano-électrique présenté précédemment de manière implicite au travers de la présence ou non d'oxyde au niveau du contact. En la traitant de façon explicite cette fois, nous allons voir comment, de façon simple, elle nous permet de prendre en compte un retour d'effet thermique sur la mécanique (hors phénomène de dilatation), puis au travers d'un cas un peu plus complexe, voir comment la mécanique peut avoir directement une rétro-action sur la physico-chimie.

2.3.4.2 Modèle scalaire

Lorsque l'on parle de physico-chimie, on fait essentiellement référence à la description de l'état de surface d'une particule, au travers d'une variable appelée énergie de surface notée ϕ, dont l'évolution peut être décrite comme fonction de la température ou bien alors décrite par un modèle d'évolution traduisant une certaine cinétique chimique. Dans un systèmes discrets, il semble naturel de relier cette énergie à la force de cohésion entre éléments. En première approche, comme proposé par Johnson et al [77], il est possible de relier la force de cohésion, notée γ, à l'énergie de surface et au rayon des particules en contact, nous permettant d'écrire :

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{r_i}{\phi_i} + \frac{r_j}{\phi_j}. \tag{2.12}$$

L'équation (2.12) nous permet de traduire le fait que la force de cohésion est nulle si l'une des particules possède une énergie de surface nulle et le fait qu'à énergie de surface fixée, l'augmentation du rayon des particules réduit la force de cohésion. Si l'énergie de surface

dépend alors de la température, l'introduction de l'équation (2.12) dans un modèle thermo-mécanique, nous permet d'avoir un retour de la thermique sur la mécanique au travers de la physico-chimie. Il faut alors être capable de décrire l'évolution de l'énergie de surface en fonction de la température. Cette loi d'évolution va bien entendu être fonction des propriétés des matériaux étudiés et doit venir de données expérimentales. Pour illustrer notre approche, nous allons ici utiliser une fonction $\phi = f(T)$ présentant une transition rapide entre une énergie de surface élevée et une énergie de surface faible. Cette transition rapide va nous permettre de mettre en évidence les phénomènes induits par cette transition. Pour cela nous utilisons l'équation suivante, inspirée des travaux de Luding et al [94] :

$$\phi(T) = \phi_0 + \delta\phi \; tanh(\frac{T_c - T}{\delta T}). \tag{2.13}$$

Le choix des paramètres va alors gouverner l'évolution de la température dans notre échantillon. La Figure 2.9 présente différents profils de température dans l'épaisseur de l'échantillon au travers de l'épaisseur du troisième corps en fonction de différentes valeurs du quadruplé $\{\phi_0, \delta\phi, T_c, \delta T\}$. Le choix des différents paramètres influence la température maximale mais également la répartition et l'évolution de la température au travers de l'épaisseur de l'échantillon. Le jeu de paramètres (d) nous permet même d'observer une double localisation. Dans la suite nous retenons le jeu de paramètre

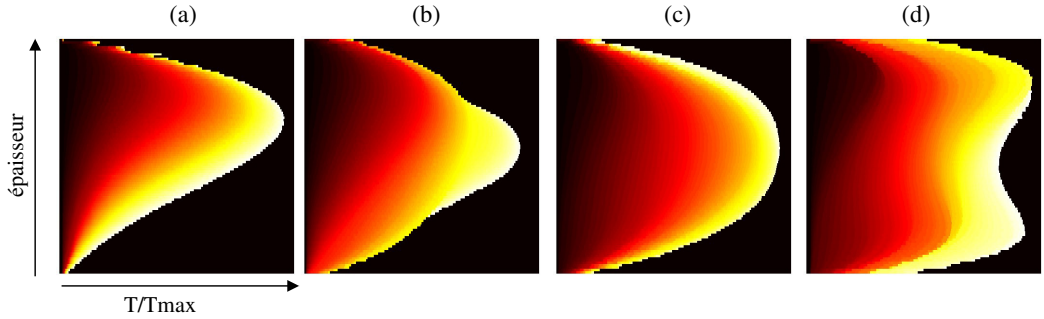


Figure 2.9 – *Profil d'évolution de température au cours du temps au travers de l'épaisseur du troisième corps en fonction de différentes valeurs du quadruplé* $\{\phi_0, \delta\phi, T_c, \delta T\}$ *: a)* $\{0.045, 0.02, 400, 50\}$*, b)* $\{0.075, 0.05, 800, 10\}$*, c)* $\{0.100, 0.05, 800, 50\}$ *et d)* $\{0.100, -0.05, 400, 50\}$.

(b) car il nous permet de désymétriser la position du maximal de température. De ce fait, l'équation (2.13) permet de garder une énergie constante pour des températures inférieures à 790° ($\phi = 0.125$) et supérieures à 810° ($\phi = 0.025$). La transition énergie élevée / énergie faible a lieu sur l'intervalle $[790, 810]$.

La figure 2.10 présente des images d'une simulation de cisaillement plan réalisée en utilisant le modèle thermo-mécanique couplé au modèle physico-chimique décrit par les équations (2.12) et (2.13). Durant les premiers temps de simulations, la température croit dans tout le milieu avec l'apparition d'une localisation proche de la paroi supérieur, comme observé avec une énergie de surface constante (i.e. une cohésion constante). Durant cette phase, il apparait que toutes les particules sont en mouvement, mobilisées

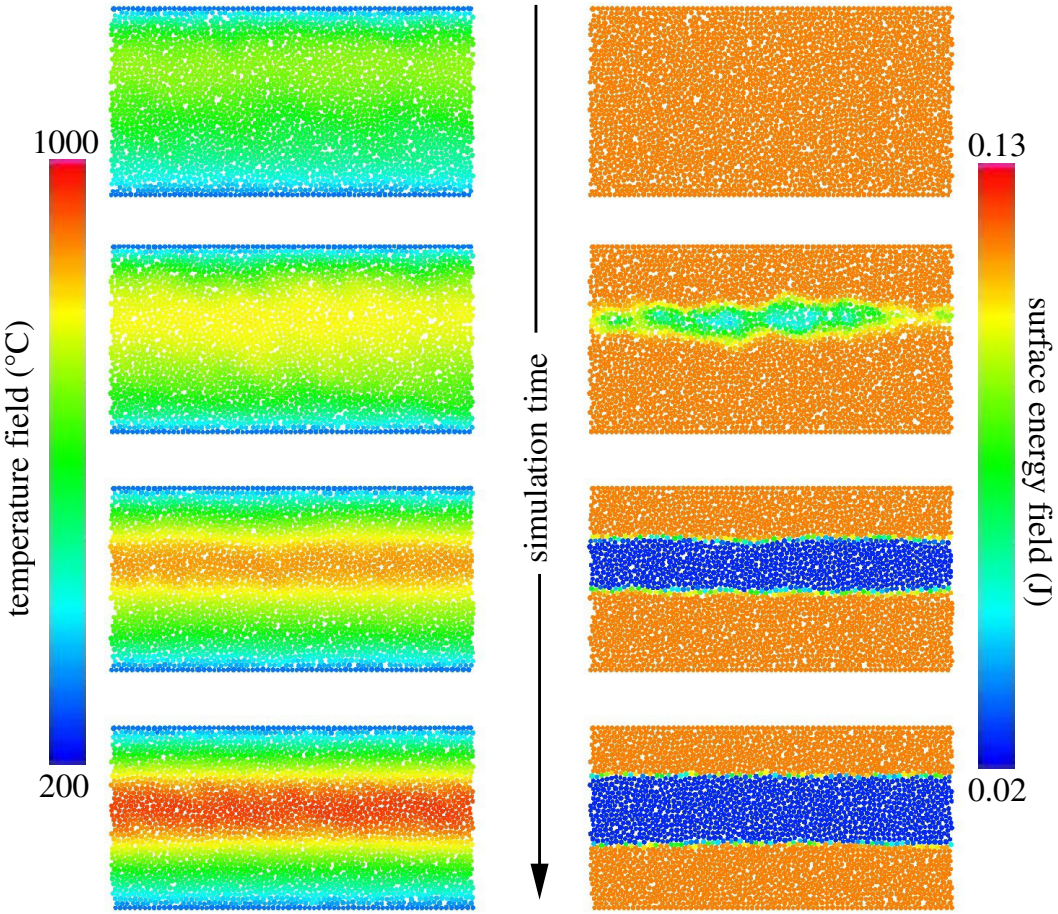


Figure 2.10 – *Evolution de température (gauche) et de l'énergie de surface (droite) au court de la simulation.*

par la vitesse de cisaillement de la paroi inférieure. Ensuite quand la température atteint le seuil donné par l'équation (2.13), l'énergie de surface des particules situées dans la bande chaude décroit rapidement et donne naissance à une bande de cisaillement accommodant le cisaillement. Le mouvement des particules situées au dessus de cette bande est stoppé, la bande de cisaillement dissipant toute l'énergie apportée par la paroi inférieure, tandis que l'ensemble des particules situées en dessous de la bande de cisaillement évolue avec la paroi inférieure comme un solide rigide. Durant le reste de la simulation l'épaisseur de la bande de cisaillement n'évolue que très légèrement. L'influence de cette localisation sur l'évolution du coefficient de frottement macroscopique et sur l'évolution de la valeur maximale de la température au sein de l'échantillon est elle aussi très intéressante (cf. Figure 2.11).

Si l'on s'intéresse tout d'abord au frottement, on s'aperçoit que celui-ci à une loi d'évolution comparable à la loi d'évolution de l'énergie de surface. Constant sur les premiers instants de la simulation, il passe rapidement d'une valeur de 0.315 à une valeur de 0.167 (cf. Figure 2.11) ; ces deux valeurs correspondent également à un frottement obtenu en utilisant une valeur d'énergie de surface constante, égale dans le premier cas

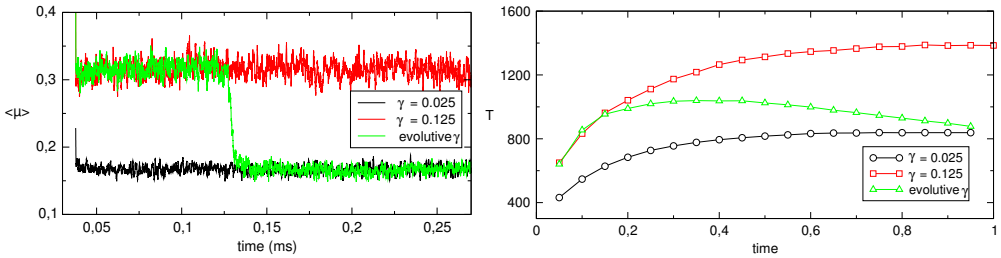


Figure 2.11 – *Parallèle entre l'évolution du coefficient de frottement moyen (à gauche) et l'évolution de la valeur maximale de la température au sein de l'échantillon (à droite).*

à une énergie de surface élevée ($\mathcal{E} = 0.125$) et dans le deuxième cas à une énergie de surface faible ($\mathcal{E} = 0.025$). La transition se produit lors de l'apparition de la bande de cisaillement et la création d'une bande d'une faible largeur (environ un tiers de la la hauteur de l'échantillon) suffit pour accommoder le cisaillement et retourner ainsi un coefficient de frottement bas.

Pour finir, si l'on regarde maintenant l'évolution de la température maximale, on peut noter qu'elle croit en début de simulation pour diminuer une fois que la localisation s'est produite. Si l'on compare, comme pour le frottement, cette évolution avec celles obtenues à énergie de surface constante, on s'aperçoit qu'elle démarre comme pour la simulation à énergie de surface élevée pour stopper son augmentation une fois la localisation produite, pour rejoindre progressivement le résultat de la simulation à énergie faible.

Ce premier modèle permet ainsi d'apprécier l'impact de la physico-chimie sur la rhéologie d'une interface. Le fait d'avoir une cohésion non uniforme et dépendant de la température, permet d'obtenir des localisations qu'il n'est pas possible d'obtenir lorsque l'on travaille à cohésion constante avec des conséquences aussi bien sur les résultats mécaniques (frottement) que thermiques (température maximale).

2.3.4.3 Modèle surfacique

Malgré ses résultats intéressants, le modèle scalaire présenté précédemment contient deux défauts majeurs. Le premier est que les actions mécaniques n'ont aucune incidence sur la physico-chimie locale ; on peut penser que l'état de surface d'une particule sera différent si localement il y a ou pas du glissement. Il faut donc intégrer dans le modèle des postulats permettant de relier mouvements relatifs locaux à l'évolution de la physico-chimie. Ce développement nous amène alors au deuxième défaut qui est que l'énergie de surface dans le modèle précédent est représentée par un scalaire pour chaque élément, connectant ainsi tout les contacts entre eux. Or si la physico-chimie d'un contact change, il n'y a aucune raison pour que les autres contacts associés à la même particule en soient affectés. Il faut donc introduire une notion de champ surfacique à chaque élément pour avoir une énergie de surface qui puisse varier d'un point de contact à l'autre. Formuler autrement, ceci souligne le fait que nous avons des échelles de temps et d'espaces différentes entre phénomènes mécaniques, thermiques et physico-chimiques.

Ce type de modèle a été développé dans le cadre de l'ANR FReIN [6], projet regroupant MBD et l'IS2M. Plus qu'un simple développement numérique autour des approches discrètes, l'idée est ici d'effectuer un dialogue avec la communauté chimiste afin de modéliser correctement les problèmes de cinétique chimique liés à notre modèle.

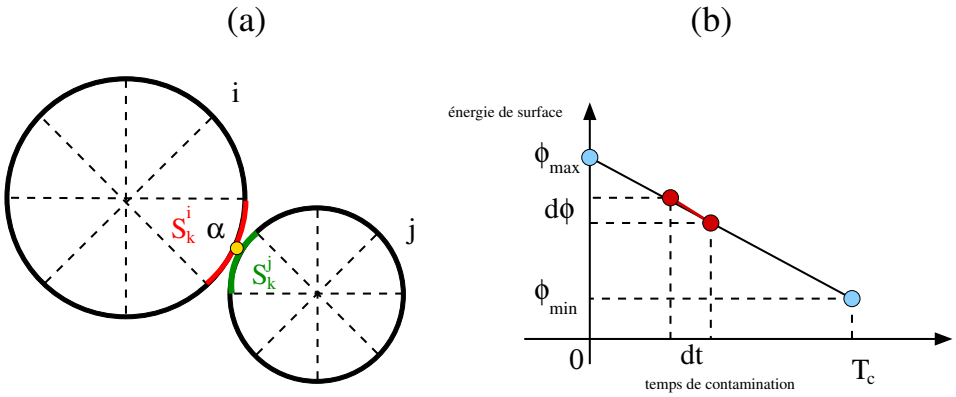


Figure 2.12 – *Schéma illustrant (a) le lien entre un contact α et les secteurs actifs pour chaque particule et (b) l'évolution de l'énergie de surface en fonction des différents paramètres.*

Le principe du modèle est illustré grâce à la figure 2.12. Afin d'introduire une notion de champ d'énergie de surface, la surface de chaque particule est discrétisée en un nombre de secteurs, noté N_s (cf. Fig. 2.12a). A chaque secteur S_k ($k \in [1, n_s]$), on associe alors une énergie de surface initiale noté ϕ_k, l'énergie de surface de la particule étant la somme des valeurs par secteur. L'énergie de surface du secteur k est alors libre d'évoluer, indépendamment du comportement des secteurs voisins.

Dans la phase de détection, lorsque un contact potentiel entre deux particules est trouvé, les secteurs correspondants sont identifiés et la force de cohésion locale est calculée, comme précédemment en fonction des l'énergies de surface et des longueurs de secteurs associés :

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{l_i}{\phi_i} + \frac{l_j}{\phi_j}. \tag{2.14}$$

Notons bien ici que ϕ a bien la dimension d'une énergie (produit d'une force par un longueur, i.e. des Joules) et non pas la dimension d'une densité d'énergie de surface (rapport d'une force par une longueur i.e. des Joules par mètre carré).

Une fois que le lien entre cohésion et énergie de surface établi, il faut déterminer comment évolue l'énergie de surface de chaque secteur afin de pouvoir faire varier les forces de cohésion locale. Si le secteur n'est associé à aucun contact, celui-ci à est dit *libre*, et évolue comme présenté sur la Figure 2.12b : à chaque pas de temps dt, l'énergie du secteur décroit d'une valeur $d\phi$ égale à :

$$d\phi = (\phi_{max} - \phi_{min})\frac{dt}{T_c}, \tag{2.15}$$

6. FReIN acronyme pour **F**rottement **R**éactif **e**t **I**nstrumentation **N**umérique

jusqu'à atteindre sa valeur minimale ϕ_{min} [7].

Si un contact est présent dans le secteur, celui-ci est considéré comme *actif*, et il faut alors regarder le statut du contact (au sens mécanique) pour déterminer l'évolution de ϕ. Pour les systèmes considérés, les hypothèses suivantes sont faites :

— si le statut est adhérent (vitesse relative tangentielle nulle), l'énergie de surface n'évolue pas (i.e. $d\phi = 0$) ;

— si le statut est glissant (vitesse relative tangentielle non nulle), il y réactivation partielle ou totale de ϕ.

Si on considère le modèle de réactivation totale, l'énergie de surface du secteur reprend sa valeur maximale (i.e. $\phi = \phi_{max}$). Si on considère un modèle de réactivation partielle, l'énergie de surface du secteur ré-augmente d'une valeur $\delta\phi_a$, traduisant ainsi une réactivation de l'état de surface grâce au glissement local.

Le modèle proposé est ensuite testé sur des tests de cisaillement simple afin d'évaluer l'influence du temps de contamination et de la réactivation sur des données globales telles que le frottement macroscopique, l'énergie de surface totale Φ définie par :

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{n_s} \phi_i^k, \tag{2.16}$$

ou encore l'énergie de surface moyenne $< \phi >$ définie par :

$$< \phi >= \frac{1}{n n_s} \Phi, \tag{2.17}$$

n et n_s désignant respectivement le nombre de particules et le nombre de secteurs.

Nous présentons et discutons ici quelques résultats regroupées dans la Figure 2.13. Celle-ci présente l'évolution du rapport entre l'énergie de surface moyenne $< \phi >$ et l'énergie de surface maximale ϕ_{max} pour différents couples (ϕ_{max}, T_c). Cette évolution est tracée en fonction du rapport entre l'incrément $\delta\phi_a$ et ϕ_{max}. Deux vitesses de cisaillement sont testées ($V = 1$ et $V = 10\ m/s$).

Plusieurs lectures peuvent être faites en comparant les résultats obtenus à ϕ_{max} ou T_c constant.

Commençons par une lecture verticale en comparant les jeux de courbes des graphes (a) et (c) ainsi que ceux des graphes (b) et (d) où seule la valeur de T_c change d'un graphe à l'autre (d'un rapport 10). Si l'on regarde la valeur du rapport $< \phi > /\phi_{max}$, elle est la même pour les cas (a)-(c) et pour les cas (b)-(d). La différence intervient au niveau des valeurs du rapport $\delta\phi_a/\phi_{max}$, valeurs plus faibles dans les cas (c) et (d) d'un rapport 10. Ceci est cohérent puisque la valeur du temps de contamination est différente. En effet, si l'on considère un secteur libre, à chaque instant (au sens pas de temps de simulation), l'énergie de surface décroît et T_c représente donc le temps nécessaire pour passer de ϕ_{max} à ϕ_{min} (i.e. 0 dans notre cas). A chaque pas de temps dt, on enlève alors à l'énergie de surface du secteur une certaine quantité, que l'on note $\delta\phi_c$. En réactivant un contact, on augmente l'énergie de surface du secteur d'une

7. Notons que la courbe d'évolution choisie est liée à l'application traitée : l'évolution pourrait être croissante, non monotone et non linéaire.

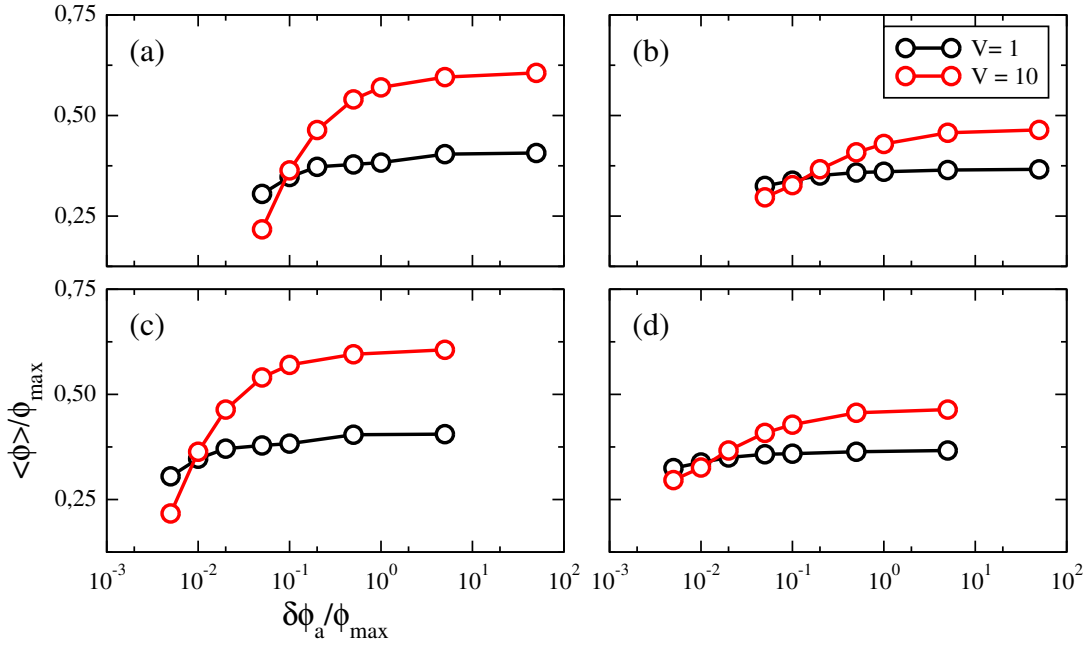


Figure 2.13 – *Evolution du rapport entre l'énergie de surface moyenne et ϕ_{max} en fonction du rapport entre $\delta\phi_a$ et ϕ_{max} pour différents couples (ϕ_{max}, T_c) et deux valeurs de cisaillement ($V = 1$ et $V = 10$) : a) $(2\ 10^{-6}, 10^{-3})$; b) $(2\ 10^{-5}, 10^{-3})$; c) $(2\ 10^{-6}, 10^{-2})$; d) $(2\ 10^{-5}, 10^{-2})$.*

certaine quantité $\delta\phi_a$ à laquelle on peut donc associer un temps de re-contamination. Il serait donc plus pertinent de tracer l'évolution du rapport $< \phi > /\phi_{max}$ en fonction de ce temps de re-contamination plutôt que du rapport $\delta\phi_a/\phi_{max}$ qui fait intervenir de façon indirecte le temps de contamination T_c. Ce dernier n'intervient donc pas sur les valeurs moyennes obtenues en régime stabilisé.

Procédons maintenant à une lecture horizontale de la Figure 2.13 en comparant les jeux de courbes des graphes (a) et (b) et ceux des graphes (c) et (d) où seule la valeur de ϕ_{max} change d'un graphe à l'autre (d'un rapport 10). L'augmentation de l'énergie de surface maximale à deux effets. Le premier est de diminuer l'influence du rapport $\delta\phi_a/\phi_{max}$. Pour les deux vitesses testées, si les courbes garde une allure identique (même monotonie), l'écart entre les valeurs minimale et maximale se réduit, entrainant ainsi une variation plus faible des valeurs du rapport $< \phi > /\phi_{max}$. Le deuxième effet est de minimiser également l'effet de la vitesse de cisaillement, puisque en chaque point l'écart diminue, ce qui sous entend que pour des systèmes très réactifs on peut s'attendre à une faible sensibilité à la vitesse.

Pour finir cette discussion, revenons à l'évolution de l'une des grandeurs d'intérêt à savoir le frottement macroscopique. Il est possible de tracer l'évolution de la valeur moyenne en fonction de l'énergie de surface totale (mesurée en régime stationnaire) pour différentes valeurs d'énergie de surface maximale et différents temps de re-contamination (cf. Fig. 2.14).

Pour chaque valeur d'énergie de surface maximale, on observe une augmentation de l'énergie de surface totale et du frottement avec l'augmentation de l'énergie

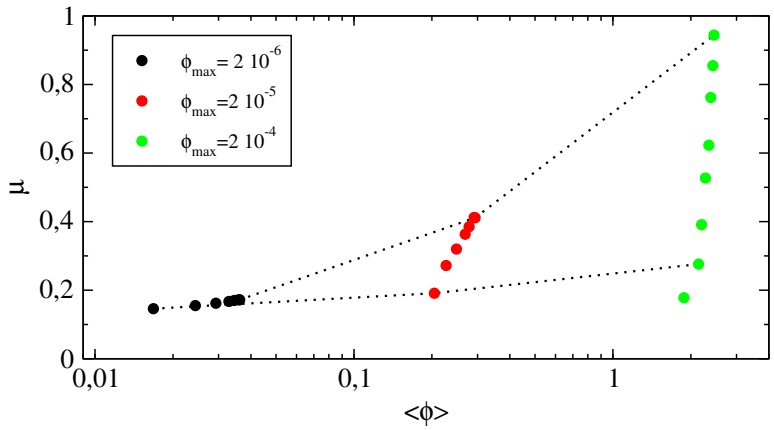


Figure 2.14 – *Evolution du frottement macroscopique en fonction de l'énergie de surface totale et différentes valeurs de re-contamination.*

de ré-activation. Pour une faible valeur de ϕ_{max}, l'augmentation de la valeur de re-contamination à beaucoup plus d'influence sur l'énergie de surface moyenne que sur le frottement, les forces de cohésion associées aux énergies de surface n'étant pas suffisamment importantes pour entrainer de fortes variations de frottement. Pour de fortes valeurs de ϕ_{max}, c'est le phénomène inverse. Il s'avère que lorsque la valeur de re-contamination est faible, cela conduit à de faibles valeurs de cohésion sur une partie de l'échantillon, favorisant ainsi la localisation de l'accommodation de vitesse. Lorsque la valeur de re-contamination est grande, la cohésion est forte dans tout l'échantillon, sollicitant celui-ci dans tout son volume, conduisant ainsi à de fortes valeurs de frottement.

Cette simple illustration montre que les cinétiques chimiques influant sur la cohésion du milieu sont importantes pour caractériser proprement la rhéologie du milieu. Elle montre également que cette rhéologie ne pas s'expliquer seulement par des effets mécaniques ou par des effets physico-chimiques mais que c'est bel et bien une combinaison des deux physiques qui doit être prise en compte.

CHAPITRE 3

Enrichissement des interfaces tribologiques : interactions avec les premiers corps

Comme évoqué précédemment, la modélisation des interfaces tribologiques s'intéresse à la représentation du milieu séparant les deux premiers corps en contact [19]. Nous avons pu voir dans le chapitre précédent l'intérêt majeur que l'on a à utiliser les méthodes discrètes pour représenter de tels milieux aussi bien pour des aspects mécaniques que multi-physiques.

Toutefois l'objectif "tribologique" de l'utilisation de ses méthodes n'est pas de se restreindre à une petite surface de l'aire de contact mais bel et bien à une surface suffisamment grande pour qu'elle puisse être caractérisée de représentative. On souhaite alors pouvoir modéliser un contact suffisamment large pour avoir des déformations locales différentes entrainant des écoulements non nécessairement homogènes.

Avec cette volonté à l'esprit, les approches précédentes, couplant écoulement de troisième corps et premier corps rigides, présentent alors de fortes limitations. En effet, si une sur-contrainte locale se produit, entrainant *normalement* une déformation locale, celle-ci va entrainer irrémédiablement une élévation de toute la paroi supérieure. Autrement-dit une sur-contrainte locale influence la globalité de l'échantillon. Pour modéliser un contact étendu, il est donc inimaginable d'utiliser des premiers corps rigides et il faut trouver des alternatives à ce type de modèle car l'impact d'une possible accommodation de la déformation des premiers corps sur la rhéologie du troisième corps est d'une importance capitale.

C'est donc naturellement que le couplage DEM/FEM s'introduit dans la modélisation tribologique. Ce chapitre synthétise les différents travaux qui ont opéré dans ce sens. Afin de regarder l'influence d'un tel couplage, nous allons nous placer dans un premier temps dans une situation d'écoulement périodique, i.e. en contact fermé sans débit d'usure, puis dans un second temps en contact ouvert en présence de débits d'usure, pour finir avec une comparaison entre résultats numériques et expérimentaux montrant que ce type d'approche peut également donner des résultats qualitatifs.

3.1 En l'absence de débit d'usure

Afin de prendre en compte ces accommodations de déformation, un travail de fond a été entamé grâce à la thèse de H.-P. Cao [29]. Dans ses travaux, H.-P. Cao couple une collection de particules rigides représentant le troisième corps avec un modèle de premier corps déformable. Pour cela il s'appuie sur l'approche NSCD [75] qui permet naturellement de coupler description rigide et déformable et ainsi mixer modèle discret et continu. Cette approche, utilisée initialement en statique pour modéliser le comportement de maçonneries vu comme des collections de blocs déformables [76], est utilisée ici en dynamique avec un grand nombre de particules mobiles et un corps déformable. Habituellement ce sont des méthodes de recouvrement qui sont utilisées pour coupler descriptions discrète et continue [14,90]. Dans ces méthodes, la partie discrète est utilisée près de la zone d'intérêt tandis que la zone continue est utilisée pour le reste de la structure, la zone de recouvrement assurant la transition entre les deux descriptions, tout en gardant une notion de continuité. Toutefois l'intérêt des travaux de thèse de H.-P. Cao étant porté sur l'évolution de l'interface sans dégradation, ce type d'approche n'est pas appropriée car il n'y a pas de continuité physique (au sens matériau) entre l'état discret et l'état continu. Cependant, pour assurer la transmission des efforts entre le système de particules rigides et le corps déformable (en particulier les efforts tangentiels), un élément de contact hybride est développé, élément consistant à venir coller une collection de particules rigides, des demi-disques pour être précis, sur le bord d'un élément.

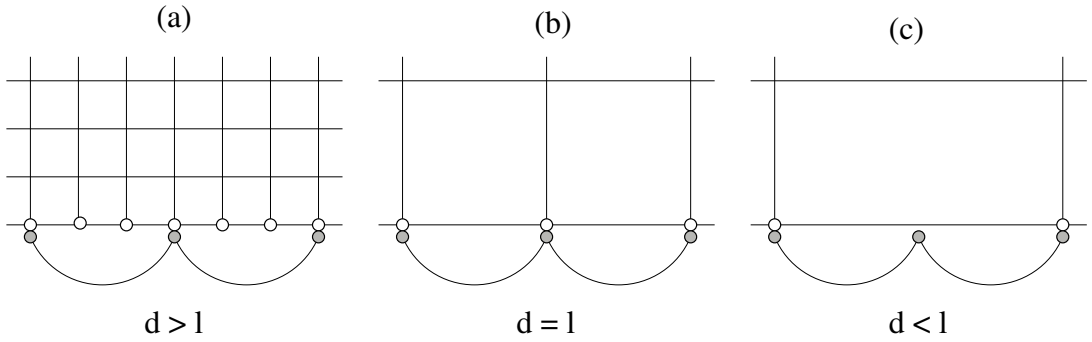


Figure 3.1 – *Représentation d'un élément hybride en fonction du diamètre moyen d des particules de troisième corps et de la taille de maille l : a) $d > l$, b) $d = l$, and c) $d < l$.*

L'utilisation de ce type d'élément, qui à l'avantage de jouer le rôle d'une rugosité attachée au premier corps, n'a de sens que si son diamètre d est inférieur ou égal à la longueur de la maille à laquelle il est rattaché. Le cas $d > l$ conduirait à envoyer une information venant d'un domaine grossier sur un domaine plus riche. Même si le proverbe qui peut le plus peut le moins s'applique ici, cela ne présente aucun intérêt d'utiliser ce type de configuration, si ce n'est l'augmentation volontaire des temps de calcul. On ne retiendra donc une utilisation de ce type d'élément que pour les cas ou $d \leq l$.

Dans ces travaux de thèse, H.-P. Cao a donc réalisé une étude comparant les résultats de la littérature [72,136] utilisant des descriptions de premiers corps purement rigide au même modèle utilisant des premiers corps déformables (cf. Fig. 3.2).

Sans exhiber tout les résultats de la thèse, il en ressort que les propriétés numérique

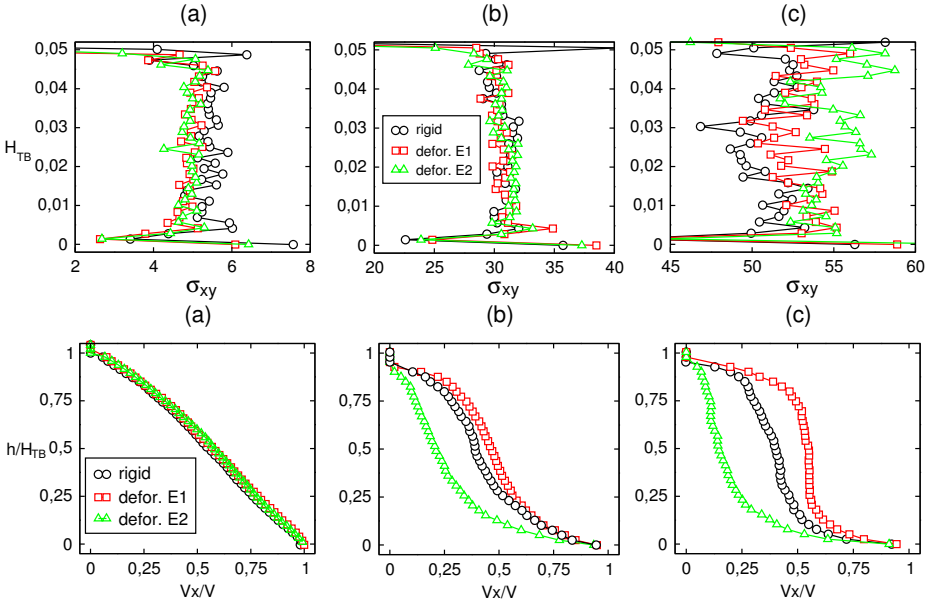


Figure 3.2

et mécanique des premiers corps (description du maillage, rigidité et comportement rigide/déformable) influencent la rhéologie du troisième corps. En terme de force (évolution du frottement macroscopique, profils des contraintes), ces propriétés ont peu d'influence, même si on observe une augmentation de l'écart type en fonction de la cohésion de l'interface. En terme de cinétique (profil de vitesse), l'influence est beaucoup est beaucoup plus marquée entre les modèles rigide et déformable, et ceci dès la présence de cohésion dans l'interface mobile. Cette différence peut s'expliquer par les accommodations locales que permettent les modèles déformables et qui rendent moins indépendants les contacts à l'interface premier corps/troisième corps. L'importance de prendre en compte l'élasticité du premier corps a également été observé ultérieurement en lubrification fluide [86], travaux dans lesquels les auteurs montrent la déviation entre modèle rigide et modèle élastique.

3.2 En présence de débits d'usure

Si les travaux précédents ont permis d'appréhender une méthode couplant approches discrète et continu a des fins tribologiques, la taille des domaines étudiés reste faible devant la taille réelle d'un contact. Il est donc difficile d'étendre les conclusions précédentes à un contact réel. Cependant l'un des intérêts du couplage FEM/DEM est de pouvoir tendre vers des largeurs de contact plus réalistes, permettant de prendre en compte localement des accommodations du à la déformation des premier corps.

Dans cette section nous présentons des résultats de simulations oeuvrant dans ce sens. En plus d'étendre la largeur du contact, des conditions de type fretting [126] sont utilisées afin de supprimer la contrainte imposée par les conditions périodiques, permettant ainsi de pouvoir prendre en compte le débit d'usure dans les simulations. Le contact se fait alors entre une structure déformable et une surface rigide rugueuse, séparé

par un troisième corps dont l'épaisseur initiale représente un centième de la longueur de la structure (cf. Figure 3.3).

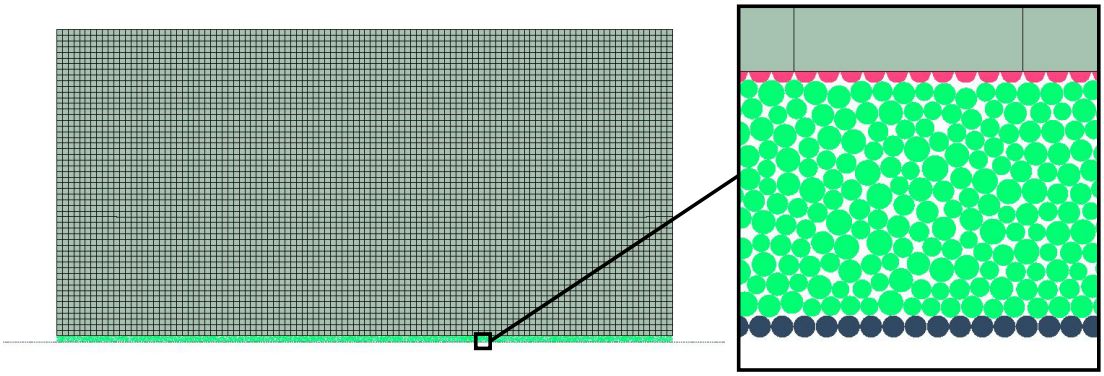


Figure 3.3

L'épaisseur initiale de troisième corps est de $2.8\ mm$, soit dix diamètres de particules environ ($d = 0.3mm$), tandis que le massif déformable a une longueur de $300\ mm$ et une hauteur de $150\ mm$. Une vitesse sinusoïdale est appliquée sur le premier corps rigide inférieur ($V = 5\sin(2\pi ft)$ avec $f = 400Hz$) tandis qu'une pression de $100\ MPa$ est appliquée sur la paroi supérieure permettant de maintenir le système en contact.

La taille d'une maille au contact est égale à environ dix diamètres de particules. De ce fait, il n'est pas possible de voir les éventuels poinçonnement des particules dans le massif (ce que permettait le modèle précédent), mais par contre, vu la longueur du contact, il est possible d'avoir des pressions non homogènes qui s'applique sur la couche de troisième corps.

De ce type de simulations plusieurs choses sont alors à regarder. La première, presque traditionnelle, est de regarder l'impact de la cohésion entre particules sur la rhéologie globale de l'interface et sur le débit d'usure rendu ici possible grâce aux conditions limites. Un intérêt plus important reste ici de pouvoir regarder l'impact des propriétés du premiers corps supérieur sur ces mêmes quantités (i.e. rhéologie et débit d'usure). La Figure 3.4 permet de visualiser l'évolution du pourcentage de particules franchissant les limites de l'échantillon , noté Φ_e, pour deux valeurs de cohésion différentes. Pour chaque cohésion, le modèle rigide traditionnel est comparé au modèle déformable pour deux valeurs d'amortissement, amortissement relié au couple (α, β) qualifiant l'amortissement de Rayleigh [89].

Nous avons pu le voir dans la section 2.2, que la cohésion influence fortement la rhéologie du troisième corps. La Figure 3.4 montre qu'il en est de même pour Φ_e. Sans cohésion, Φ_e atteint 10% de particules éjectées pour $0.02\ s$ de temps simulé et présente un flux quasi constant (croissance linéaire de Φ_e). En revanche, en présence de cohésion, Φ_e atteint péniblement 2% de particules éjectées pour un temps simulé de $0.12\ s$ avec une évolution beaucoup plus lente pouvant présentée des décroissantes. Ces décroissances sont dues au retour de certaines particules dans le contact, retour possible grâce à la forte force de cohésion.

Un autre résultat important est l'influence du comportement du premier corps sur Φ_e. Si pour les deux valeurs d'amortissement testées, on ne distingue pas de différence

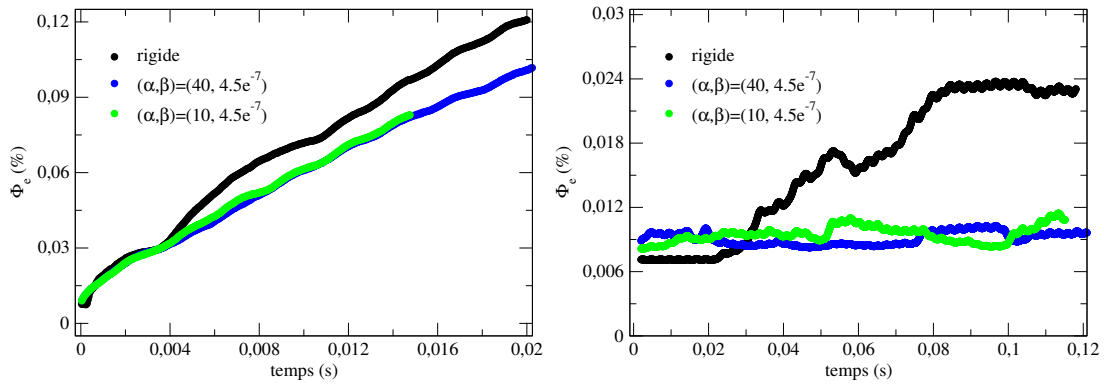


Figure 3.4 – *Evolution de Φ_e, pourcentage de particules franchissant les limites de l'échantillon pour deux valeurs de cohésion différentes : (a) sans cohésion et (b) forte cohésion.*

notable, il en existe une entre les simulations réalisées avec un premier corps supérieur rigide et celles réalisées avec un premier corps déformable. Le modèle rigide tend à accentuer le débit d'éjection indépendamment de la cohésion. On peut toutefois souligner que l'écart entre les différents modèles est lui fonction de la cohésion : un écart de 30% sans cohésion et un écart de 100% pour une forte cohésion.

L'ajout d'un degré de liberté au débit de troisième corps permet ici de mettre en avant des couplages entre l'échelle de l'interface et l'échelle de la structure. Si l'existence de ses couplages ne faisait jusqu'ici aucun doute, l'utilisation de méthode couplée permet aujourd'hui de les mettre en avant. Bien entendu, le travail présenté dans cette section reste encore exploratoire et il demanderais d'être poursuivi sur de nombreux aspects que nous exposerons dans le dernier chapitre.

3.3 Du quantitatif vers le qualitatif ?

En partie grâce aux travaux de thèse de H.-P Cao présentés précédemment, il est possible de coupler approche discrète et continue au sein d'un même simulation [29, 30], en utilisant un couplage éléments finis/éléments discrets. Ce type de couplage est un premier pas vers un dialogue entre échelles surtout lorsqu'il est possible d'avoir/de garder un grand rapport "taille de maille/rayon de particules". Néanmoins, même si ces travaux ont permis de franchir un pas important, ils n'en restent pas moins phénoménologiques car construit sur des modèles sans réalité physique, s'inscrivant plus dans une étude de faisabilité numérique.

Dans le but de poursuivre cette démarche, en essayant de tendre vers des résultats plus quantitatifs, un dispositif expérimental modèle a été construit afin de pouvoir analyser le comportement des corps en contact et les particules de troisième corps [129] et ainsi pouvoir confronter résultats expérimentaux et numériques. Ce travail est le fruit de l'ANR Jeunes Chercheurs DiNEET - Dialogues Numériques Entre Echelles Tribologiques ANR-JCJC-0020-08, menée en collaboration avec F. Massi, A. Saulot et N. Fillot.

Le but principal de ce projet ANR était de pouvoir confronter résultats expérimentaux et numériques sur un dispositif "tribologique" mettant en jeu différentes échelles.

Le point clé a donc été de concevoir un dispositif expérimental en parallèle d'un modèle éléments finis afin d'avoir le plus de points de comparaisons possible. De nombreuses interactions ont été nécessaires afin de définir à la fois le modèle et pour optimiser le design du dispositif expérimental. Une fois cette étape effectuée, une première confrontation expérimental/numérique a été réalisée à l'échelle des corps en contact afin de valider le modèle, en terme de comportement vibratoire en absence de troisième corps. Ce travail, honteusement synthétisé en quelques lignes est essentiellement celui d'Aurélien Saulot (voir son HDR pour plus de détails [141]) et F. Massi [129] et ne sera pas détaillé ici.

Le travail nous a servie alors de base pour pouvoir effectuer une seconde confrontation réalisée en présence cette fois-ci de troisième corps afin d'analyser le comportement des particules de troisième corps sur la dynamique du système, travail réalisé également avec V.-H. Nhu dans le cadre de sa thèse [112]. Nous proposons ici de faire une synthèse de cette partie , en en soulignant les résultats qui nous semblent remarquables et de proposer une analyse plus détaillée de certains aspects plus numériques. Le dispositif expérimental est décrit rapidement dans l'annexe 5.2 et dans l'habilitation à diriger des recherches de Aurélien Saulot [141].

3.3.1 Identification expérimentale ...

3.3.1.1 des régimes d'instabilités ...

Après une calibration du dispositif expérimental une première analyse paramétrique est réalisée (dilatation radiale, vitesse de rotation, état de surface des corps en contact) [129, 130], une identification des régimes d'instabilités est réalisée, en présence ou non de troisième corps au moyen de spectrogramme permettant de visualiser l'accélération plan ou hors-plan.

La Figure 3.5 montre le spectrogramme obtenu lors d'une première expérience réalisée avec une expansion radiale de $30\ \mu m$ et une vitesse de rotation $\omega = 0.1\ m.s^{-1}$. Cette expérience ne conduit pas à la création de particule de troisième corps. Le spectrogramme (cf. Figure 3.5a) est caractérisé par une fréquence principale de $7.5\ kHz$ et ses harmoniques. Le comportement harmonique des vibrations à la fréquence naturelle du système est caractéristique de vibrations auto-entretenues du à un couplage modal [149], en notant que cette valeur peu être légèrement différente d'un disque à un autre [1]. Ainsi, la fréquence principale des instabilités produites expérimentalement évolue dans un intervalle de main $7.5\ kHz \pm 1.5\ kHz$ tout en conservant une allure similaire pour le mode (instable) excité.

Après une période de rodage en utilisant les mêmes conditions limites, la création de particules de troisième corps commence (i.e. une augmentation des débits de troisième corps). Commence alors une compétition entre les régimes d'instabilités présent depuis le début de l'expérience et la naissance plus tardive de particules de troisième corps. Si le nombre et la taille de ces particules est suffisamment petit, aucun changement n'est visible sur le spectrogramme. Si les particules de troisième corps atteignent une taille

1. Ce type de comportement est du à la fois à la sensibilité aux conditions limites appliquées sur la partie extérieure du disque ainsi qu'à la tolérance machine du diamètre intérieur du disque inférieure à $5\ \mu m$

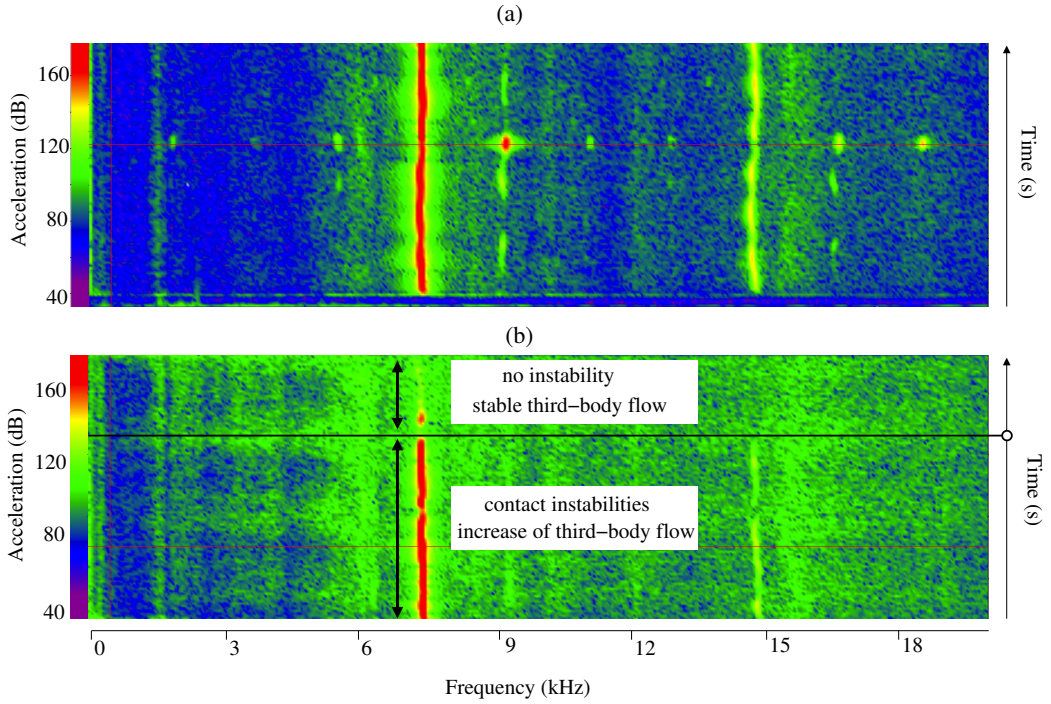


Figure 3.5 – *Spectrogramme des instabilités de contact (a) lord de l'augmentation de quantité de troisième corps et (b) avec une quantité constante de troisième corps pour une expansion radiale de* $20\ \mu m$ *et une vitesse de rotation* ω *égale à* $0.2\ m.s^{-1}$.

critique, se produit alors une transition entre un état instable et un état stable, comme souligné par la Fig. 3.5b, où l'on voit disparaître la fréquence de vibration d'environ $7.5\ kHz$.

3.3.1.2 des contraintes locales ...

Grâce aux propriétés de biréfringence du disque de polycarbonate, une analyse des isochromes est réalisée afin d'obtenir l'évolution des contraintes déviatoriques (i.e. $|\sigma_1 - \sigma_2|$) durant la rotation du cylindre en acier (cf. Fig. 3.6).

Initialement, la contrainte deviatorique (τ_{max}) est proche de $0.7\ MPa$ (2 franges). Quand les instabilités apparaissent, due aux forces de contact, on observe une oscillation de la distribution des contraintes locales. Il en résulte une évolution de τ_{max} entre $0.7\ MPa$ (2 franges) et $1.4\ MPa$ (4 franges) (cf. Fig. 3.6a).

Ainsi, les instabilités de contact disparaissent et une quantité non négligeable de "grande" particules de troisième corps (environ $20\ mm$ de long et $50\ \mu m$ d'épaisseur) est observée dans le contact (cf. Fig. 3.7). La présence de ces particules est directement mis en évidence par l'augmentation locale du nombre de franges (cf. Fig. 3.6b and Fig. 3.6c) sur les isochromes.

La rotation du cylindre conduit à la création et à la migration de particules de troisième corps au niveau de l'interface de contact. Dans les zones très locales où se situe les particules de troisième corps, τ_{max} atteint des valeurs 10 fois plus grandes (soit environ $7\ MPa$) que les valeurs initiales (i.e. sans troisième corps).

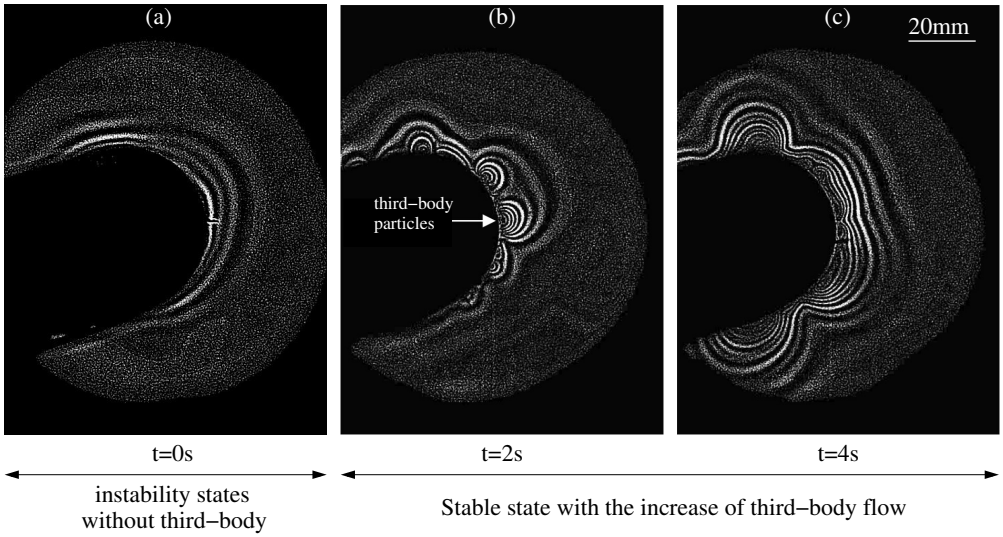


Figure 3.6 – *Evolution des isochromes lors de la création de particules de troisième corps pour une expansion radiale de* $20\ \mu m$ *et une vitesse de rotation* $\omega = 0.2\ m.s^{-1}$.

3.3.1.3 ... et des particules de troisième corps.

Lorsqu'une quantité suffisante de troisième corps est crée afin de supprimer les instabilités de contact, l'expérience est arrêtée et la surface du diamètre intérieur du disque est observé avec un microscope (cf. Fig. 3.7).

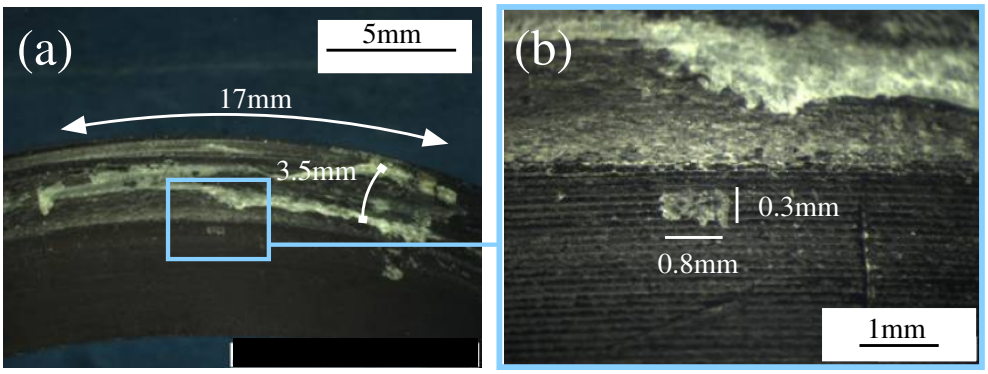


Figure 3.7 – *Zoom effectué au microscope binoculaire de particules de troisième corps situées à la surface du diamètre intérieur.*

Ces particules de troisième corps présentent différentes formes et tailles. Deux types de particules sont distingués : les grandes et les petites. La taille des grandes particules n'est pas négligeable devant la taille du contact (plusieurs millimètres de large, plusieurs dizaines de millimètres de long et plusieurs dizaines de micromètres d'épaisseur) et ne sont observées que lorsque les instabilités cessent. La taille des petites particules est proche d'une centaine de micromètres, avec une épaisseur de quelques micromètres. De plus ces dernières sont observés même si les instabilités perdurent.

En première approximation, il n'est donc pas idiot d'affirmer que les grosses particules peuvent être vue comme une agglomération de petites particules.

3.3.2 Modèle numérique

Afin de reproduire le dispositif expérimental, un modèle numérique bi-dimensionnel est utilisé. De part la différence de module d'Young entre l'acier et le polycarbonate, le cylindre intérieur est considéré comme rigide. Le disque en polycarbonate est représenté par un maillage constitué de 15 400 éléments Q4 (intégration linéaire à quatre points) où la longueur d'un élément au contact est égale à $0.58\ mm$. Les propriétés matériaux (Module de Young, coefficient de Poisson, densité et rayon) correspondent aux données expérimentales. (cf. Tab. 5.1 de l'annexe 5.2).

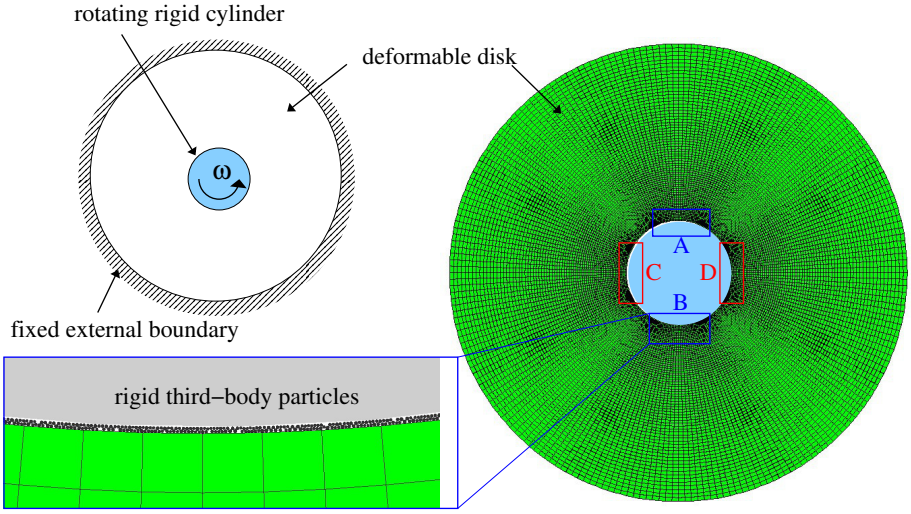


Figure 3.8 – *Modèle numérique utilisé pour les simulations FEM et FEM-DEM.*

Afin de rester fidèle aux observations expérimentales, nous introduisons la notion de macro-particule. Celles-ci sont vues comme un assemblage de particules rigides jouant le rôle de particules élémentaires (avec un diamètre de $20\ \mu m$). L'effet "macro-particule" interviendra grâce à la loi d'interaction reliant les différents éléments. Une loi unilatérale cohésive réversible est utilisée dans le cas présent afin de permettre à la macro-particule de subir de grandes déformations, se séparer et se ré-agglomérer. Cette loi fait intervenir un seul coefficient, la cohésion entre particules, notée γ. Quatre valeurs de cohésion sont choisies : 0, 0.1, 0.2 et $1.0\ N$. Ces différentes valeurs peuvent caractériser implicitement des variations dans les propriétés des particules (l'énergie de surface par exemple). La valeur maximale de $1\ N$ est choisie de façon à avoir une résistance interne à la macro-particule équivalente à la résistance en traction du polycarbonate (proche de $60\ MPa$) [103].

Deux macro-particules de troisième corps sont utilisées dans le modèle FEM-DEM et placées initialement dans les zones A et B presentées sur la Fig. 3.8. L'épaisseur initiale des macro-particules (dans la direction radiale) est égale à $50\ \mu m$. La macro-particule A (resp. B) est composée de 203 (resp. 628) particules rigides.

Comme pour les essais expérimentaux, les simulations effectuées comprennent une phase d'expansion de $0.15\ mm$ du cylindre intérieur, suivie d'une mise en rotation du cylindre avec une vitesse ω égale à $6.25\ rad.s^{-1}$ équivalent à une vitesse linéaire de $0.1\ m.s^{-1}$ à la surface de contact. Le contact entre le cylindre et le disque est une loi de

contact unilatérale associé à un frottement de Coulomb. On trouve dans la littérature, des valeurs de "frottement" comprises entre 0.3 et 0.7. Cependant, si l'on se réfère à des études précédentes pour une vitesse angulaire égale à $6.25\ rad.s^{-1}$, la valeur de μ n'affecte pas le régime d'instabilités. En conséquence, une value de 0.3 est choisie pour le contact entre cylindre et disque. Notons que la même valeur est utilisée pour le contact entre particule et cylindre et particule et disque.

3.3.3 Discussions

Nous présentons ici les comparaisons réalisée entre les modèles numériques et expérimentaux en présence de particules de troisième corps. Comme pour le modèle éléments finis, la trajectoire d'un noeud d'une des zones d'intérêts est mesurée durant le processus frottant dont le spectre fréquentiel est ensuite calculé. Le modèle combiné FEM-DEM présente une fréquence proche de 9.7kHz.

Ensuite, la déviateur du tenseur de contrainte est observé et comparé avec les observations expérimentales (cf. Fig. 3.9).

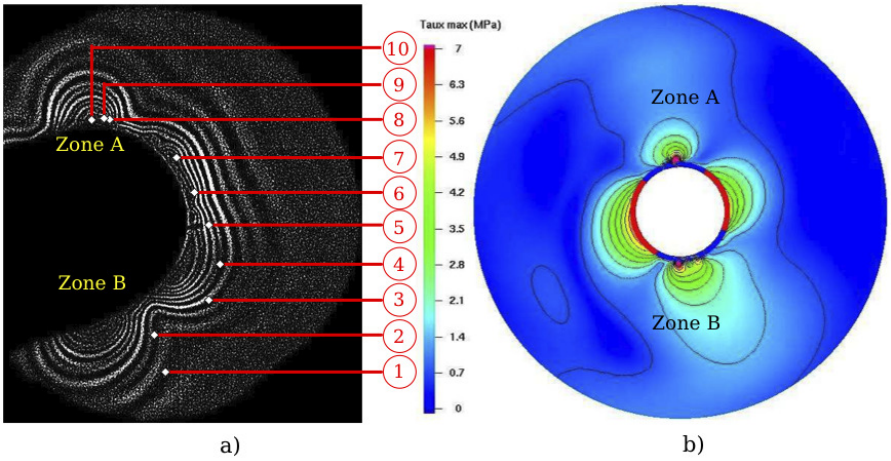


Figure 3.9 – *Comparaison du champ de contrainte déviatorique entre le modèle FEM-DEM et les résultats expérimentaux avec troisième corps.*

En faisant un zoom sur l'interface de contact, il est alors possible de comparer avec précision les simulations numériques utilisant des macro-particules introduites artificiellement et le modèle expérimental générant naturellement des particules de troisième corps. La comparaison montre une très bonne corrélation entre les deux modèles en terme de régimes d'instabilités et de valeur de contraintes. Le nombre d'ordre (associé aux franges) donne un niveau équivalent au contrainte des modèles numériques. Dans les deux cas, on observe un taux de contrainte proche de 7 MPa.

Pour finir, en complément des comparaisons entre les résultats expérimentaux et numériques, l'approche couplée FEM/DEM est utilisée pour analyser l'influence des propriétés du troisième corps sur le comportement global. Afin d'analyse la rhéologie du troisième corps, l'interface de contact est divisée en 220 secteurs angulaires dont la longueur correspond à la longueur d'un élément au contact du maillage. Ainsi à chaque instant de la simulation, les particules sont associées à un secteur en fonction de leur

position. Il est alors possible de calculer la moyenne de différentes quantités attachées aux particules, comme par exemple la norme de la vitesse, $V(\mathcal{S}_k)$, ou encore la partie déviatorique du tenseur de contrainte, $\tau(\mathcal{S}_k)$ [11].

Ainsi, la Figure 3.10a propose une visualisation de la vitesse moyenne calculée sur chaque secteur lors de la rotation du cylindre intérieur, permettant ainsi d'observer le champ de vitesse au sein de la macro-particule et ce pour différentes valeurs de cohésion.

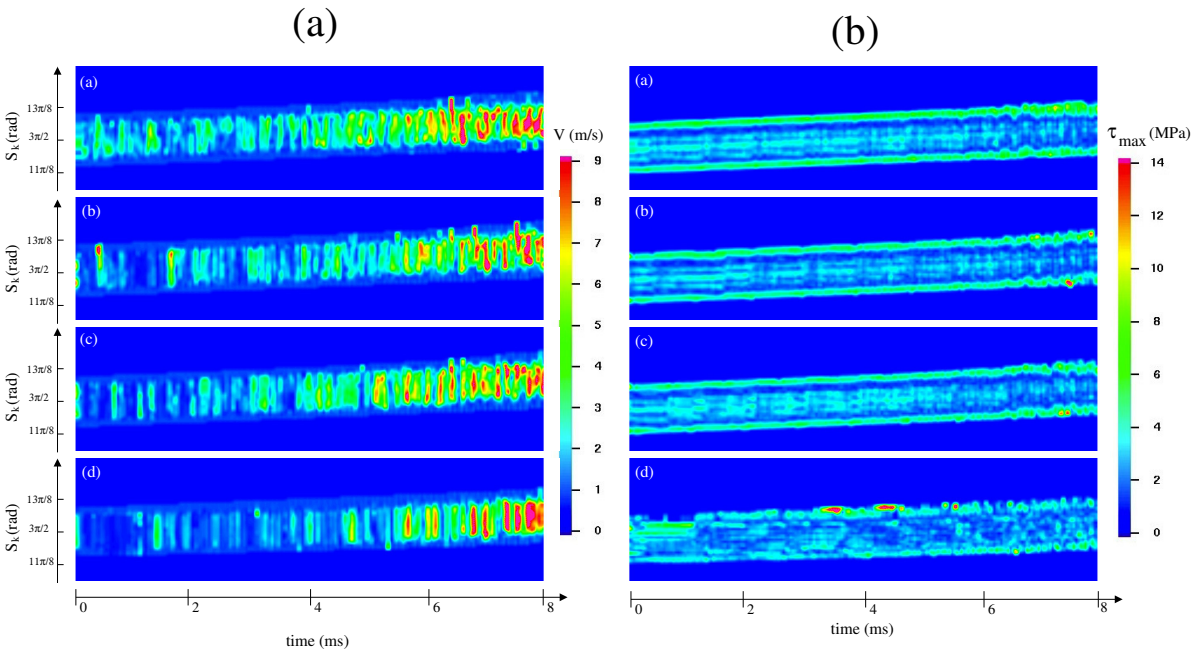


Figure 3.10 – *Visualization of (a) the equivalent velocity field and (b) the equivalent deviatoric stress within a macro-particle during the process for different cohesion values : a) 0, b) 0.1, c) 0.2 and d) 1.0.*

On peut noter que la valeur de la cohésion n'affecte pas la migration de la macro-particule. Dans chaque cas, la macro-particule occupant initialement 26 secteurs, en occupe 29 à la fin de la simulation. Cependant, le champ de vitesse à l'intérieur d'une macro-particule peut-être six fois plus grand que la vitesse de rotation. Cette observation souligne le fait que des réarrangements se produisent au sein d'une macro-particule, même si son allure globale n'évolue pas. Ces mouvements peuvent être reliés à une auto-réorganisation ou a une "vibration" induite par les ondes se propageant dans le disque en polycarbonate.

Pour compléter les observations réalisées sur la dynamique locale, la Figure 3.10b présente la contrainte déviatorique équivalente au sein d'une macro-particule. La figure mets en évidence que seule la forte force de cohésion affecte la répartition de contrainte au sein de la macro-particule. Pour de faible valeur de cohésion, la contrainte déviatorique atteint sa valeur maximale aux extrémités de la particule, ceci durant tout le processus. Pour des valeurs de cohésion plus grandes, cette répartition commence à devenir chaotique, particulièrement pour le devant de la macro-particule. En terme d'intensité de contrainte, le point frappant est que la valeur moyenne calculée dans la particule est égale à celle calculée dans le modèle continue, qui elle correspond aux résultats issus

de l'expérience. Ainsi, il s'avère que l'on a une très bonne concordance entre le modèle discret, le modèle continu et le modèle expérimental. Notons toutefois que l'on peut observer sur la Fig. 3.10b des contraintes deux fois plus importantes que la valeur moyenne. Ceci pointe les limites du modèle constitué dans un premier temps uniquement de particules rigides. L'absence de déformation ou même de mode de fragmentation conduit à des surcontraintes locales se qui suggère d'introduire ces aspects dans des travaux futurs afin de réduire ces effets.

CHAPITRE 4

Transition premiers/troisième corps

4.1 Introduction

Jusqu'à présent les méthodes par éléments discrets étaient essentiellement utilisées pour représenter des milieux discontinus par nature, même si il n'y avait pas d'analogie directe entre particule réelle et particule numérique. En poussant la modélisation un peu plus loin, rien ne nous empêche alors d'utiliser ce type d'approche pour représenter un certain volume Ω sans pour autant que ce volume présente des discontinuités. Les méthodes DEM peuvent ainsi devenir un palliatif à des approches plus conventionnelles et sont alors étendues pour résoudre une certaine gamme de problèmes, non ou pas encore accessible par des méthodes basées sur la mécanique des milieux continus avec (FEM [71], x-FEM [106], ...) ou sans maillage (NEM [146], SPH [107], ...).

On trouve dans la littérature différents travaux représentant un continuum via un modèle discret. Ces modèles couplent usuellement modèles de zones cohésives et collection d'éléments déformables. L'avantage de ces approches est d'avoir une reproduction fidèle du domaine initial (pas de perte de volume) et de séparer les données volumiques, associées aux particules, des données d'interfaces, associées aux lois de contact et qui doivent être déterminées par exemple, par des comparaisons avec des données expérimentales. Cependant, dans la plupart des cas (pour ne pas dire tout les cas), on ne s'intéresse pas à l'évolution dynamique du domaine et seul l'évolution de front de fissure ou l'endommagement du matériau est traité [118]. La limitation a ce type d'étude se comprends assez bien car souvent les approches ne permettent pas de gérer correctement le contact entre les éléments libres et dans le cas où le traitement du contact entre élément est possible, il faut pouvoir utiliser un formalisme prenant en compte les rotations des éléments (grandes déformations, approche co-rotationelle,...) Dans le cas de la modélisation de l'usure, il faudrait pouvoir faire évoluer l'élément détaché au sein du contact, le soumettant à de très grandes déformations conduisant à un raffinement de chaque élément détaché, faisant apparaître ainsi les limites du modèles non pas tant dans le principe de la modélisation mais dans le choix des comportements physiques ainsi dans la capacité des machines de calculs actuelles.

Pour faire face à ce problème, reprenons le problème à contre courant, en regardant ce qui est notre finalité. Dans le cas de l'usure, ce que l'on recherche est bien de pouvoir

avoir création de débits au sein du contact : un débit source (i.e. les éléments qui se détachent), un débit interne (i.e. les éléments qui évoluent dans le contact) et un débit d'usure (les éléments définitivement éjectés du contact). Les approches discrètes permettent naturellement ce type de modélisation si tant est que l'on soit capable d'utiliser des lois d'interaction représentatives. Il faut donc avoir un volume discret suffisamment conséquent pour qu'il puisse permettre la création de ces débits.

Vient alors le choix des éléments en terme de comportement volumiques, de géométrie ou de loi d'interaction. Concernant le comportement volumique, un comportement rigide semble le seul à même de modéliser ce que l'on souhaite observer (des débits !). Pour la géométrie, il est alors possible d'avoir recourt à des formes polygonales pour avoir un pavage idéal est respecter la contrainte d'un volume de vide nul. Cependant un pavage de polygone rigide ne permet aucune déformation, si ce n'est d'utiliser des lois de contact autorisant la pénétration entre éléments. Ceci est un choix mais qui peut être vu comme contradictoire avec la contrainte d'un volume de vide nul et tendancieux si on souhaite associer pénétration et déformation. Le choix peut alors se porter sur des disques rigides. Une poly-dispersité suffisante permet de minimiser le volume de vide. Mais ce même volume de vide permet une déformation naturelle du milieu ce qui représente un avantage non négligeable et dans certain cas peut-être associé à la porosité du matériau, si celle-ci à un sens.

4.2 Pour une analyse locale

4.2.1 Mise en place d'une méthodologie

A l'échelle des structures, le frottement est représenté usuellement par un modèle de Coulomb se basant sur un coefficient constant. Il s'agit d'un postulat général de la description du frottement alors que celui-ci dépend, entre autres, des sollicitations à la surface du contact à l'instant t. En passant à l'échelle du troisième corps, le frottement local peut ne plus être représenté par un coefficient constant mais peut être mesuré de façon "plus naturelle" ou du moins plus locale. Par contre, ce frottement local résulte d'effets complexes tels que :

- la géométrie (rugosité) de troisième corps/premiers corps dans le contact ;
- l'apparition de débit source (dégradation des premiers corps) et de débit interne dans le contact ;
- la déformation des premiers corps et/ou troisième corps ;
- l'adhésion (physico-chimie) entre les corps dans le contact ;
- le débit d'usure.

Tous ces phénomènes sont importants pour décrire le frottement de façon plus naturelle, description qu'il est souvent difficile d'obtenir à l'échelle des corps en contact ainsi que dans les approches expérimentales. Afin de s'inscrire dans la démarche présentée dans la section introductive précédente, il faut arriver dans un premier temps à évaluer les proportions des différents acteurs jouant sur le frottement.

4.2.2 Caractérisation locale

Afin de contribuer à cette compréhension, Nhu modélise dans ses travaux de thèse [112] un volume élémentaire (nous soulèverons la question de la représentativité plus loin) par une collection d'éléments discrets. Le comportement macroscopique type élastique fragile du matériau est obtenu en utilisant localement, au travers d'un modèle de zone cohésive. Cette loi permet de représenter un modèle continu équivalent, pouvant naturellement se dégrader, et de caractériser cet endommagement au travers d'une variable d'endommagement β_α intégrée à chaque contact. On peut ensuite définir grâce à cette variable deux variables qui nous servirons dans l'analyse des résultats. La première variable β_i accroché à une particule est vue comme la somme des β_α de l'ensemble des contacts de la particule, divisé par le nombre de contact de la particule, β_i étant alors compris entre 0 et 1. La seconde variable est encore plus globale puisqu'elle permet de caractériser l'endommagement du VE. Baptisée β, elle est égale à la somme de l'ensemble des β_α, divisé par le nombre de contact total.

Différentes étapes vont ensuite être nécessaire à la construction du VE. Une fois choisie un taille donnée différentes caractérisations vont devoir être nécessaire pour déterminer la valeurs des différents paramètres numériques impliqués. Dans sa thèse [112], Nhu utilise un VE bi-dimensionnel de $50\ \mu m \times 50\ \mu m$. L'échantillon est constitué d'environ 5 600 disques rigides dont le diamètre moyen est de $0.7\ \mu m$. Lors de la caractérisation volumique, les paramètres de la loi de contact CZM sont adaptés pour retrouver un module d'Young égal à 10 000 MPa. V.-H. Nhu analyse l'influence de l'empilement et montre que celui-ci n'est influant que si il est régulier (i.e. cristallin, c.f. Fig.4.1), différent tirage aléatoire donnant la même évolution de la contrainte.

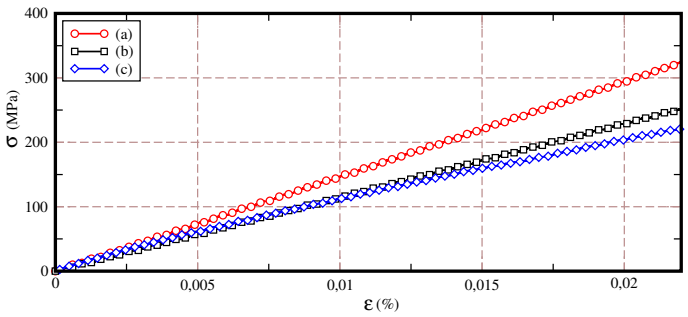


Figure 4.1 – *Courbe (σ-ϵ) caractéristique de l'essai de traction avec la loi IQS-CZM pour les empilements hexagonal (a), carré (b) et aléatoire (c).*

Cette différence peut s'expliquer par le fait que le nombre de contact moyen, noté n_c, change d'un empilement à l'autre (sauf pour les empilements aléatoires où la valeur est légèrement supérieure à 4). De ce fait, on remarque que l'empilement carré pour lequel n_c vaut 4 (la plus petite valeur), possède le module d'Young équivalent le plus faible. Viennent ensuite l'empilement aléatoire et l'empilement hexagonal. L'empilement hexagonal possédant alors le nombre de contact le plus grand va être localement plus contraint, entrainant alors une plus forte rigidité macroscopique (la raideur en traction de chaque contact étant constante). Pour s'affranchir de cet effet, on peut imaginer réaliser une pondération sur chaque interaction, en fonction du voisinage de chaque grain,

pondération pouvant être déterminer, par exemple, grâce à un pavage de Voronoï de l'échantillon (fonctions de forme ? !).

Une fois cette caractérisation réalisée, une caractérisation surfacique est effectuée afin de déterminer une valeur de frottement macroscopique à débit source nul dans un premier temps puis en prenant en compte la présence du troisième corps (débit source non nul) dans un second temps. Ce frottement initial peut être associé à la notion de frottement statique utilisé par exemple en calcul des structures. Il permet ici de servir de valeur de frottement de référence. Lors de cette caractérisation, l'influence de différents paramètres est étudiée : la rugosité de l'interface, la force de cohésion entre particule et de la raideur au contact. Il en ressort plusieurs observations.

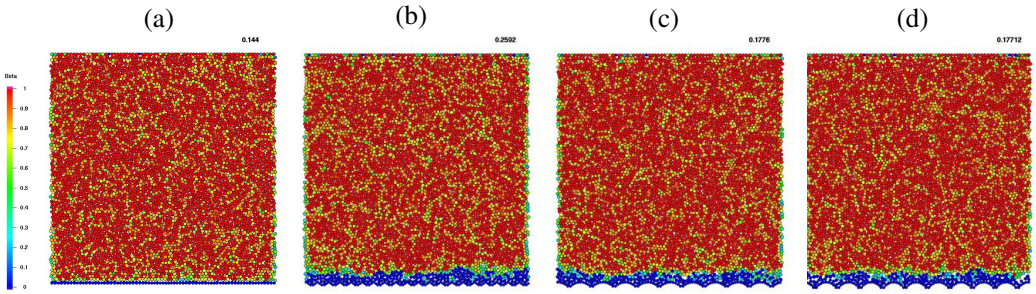


Figure 4.2 – *Evolution de l'endommagement d'un VER sous l'effet du cisaillement d'une paroi plus ou moins rugueuse : (a) ra = 0.13 d, (b) ra = d, (c) ra = 2 d et (d) ra = 2 d (d étant le diamètre moyen des particules).*

On observe dans chaque simulation la formation d'une couche de troisième corps stabilisée et un volume plus ou moins important de premier corps préservé. On constate également l'apparition d'une zone intermédiaire dans laquelle la valeur de β_i est comprise entre 0 et 1 (écran de surface ou TTS [1] numérique ?).

On constate également que :

— en l'absence de cohésion, la rugosité n'influence pas la couche de troisième corps créé car le troisième corps bouche rapidement les rugosités ;

— l'augmentation de l'énergie à rupture de la loi de contact réduit logiquement l'épaisseur de troisième corps créé, en notant que pour une énergie relativement faible, il est possible d'avoir une fragilisation du milieu loin du contact ;

— en absence de cohésion, la raideur en compression au contact influence peu la couche de troisième corps formé et à tendance à lisser les courbes d'évolution, jouant alors également un rôle de régularisation au contact macroscopique ;

— en présence de cohésion, la hauteur de troisième corps formé évolue, pouvant représenter la moitié de la hauteur de la cellule, posant alors pour les cohésions les plus fortes, la question de la représentativité du volume choisi.

On est ainsi capable de créer localement un VER ayant les mêmes propriétés qu'un milieu continu au travers des paramètres Cn, w et k (caractérisation volumique) mais également d'obtenir le coefficient de frottement moyen souhaité au travers du paramètre de cohésion γ et la rugosité (caractérisation surfacique). Notons toutefois qu'avec les

1. Transformation Tribologique de Surface

modèles de loi utilisé (modèle CZM [76]), l'application de cette approche ne peut se faire qu'au matériau dit fragile. Pour les matériaux ductiles des extensions sont nécessaires et seront évoquées dans le dernier chapitre.

4.2.3 Extension au matériau composite C/C

4.2.3.1 Aspects mécaniques

La mise en place de cette méthodologie ne présente pas uniquement un intérêt "académique" mais présente également un intérêt industriel en vue de répondre à des questions comme celles contenues dans les travaux de thèse de M. Champagne [32], travaux visant à proposer des scénarios permettant de décrire l'endommagement des composites Carbone/Carbone (C/C) sous sollicitations tribologiques. En s'appuyant ainsi sur un atlas d'observation d'endommagement de composite C/C, M. Champagne construit différents scénarios qu'il souhaite valider en utilisant l'approche présentée précédemment. Sa démarche lui permet ainsi de répondre à différentes questions, de mettre en évidence la transition surface/volume dans ce type de matériau et à proposer pour la première fois une solution au phénomène appelé "bosse d'usure". Nous n'allons pas revenir sur l'ensemble des travaux, laissant le soin au lecteur de se référer au manuscrit de thèse [32], mais essentiellement sur les aspects numériques de la thèse en soulignant deux des résultats marquants.

Nous rappelons tout d'abord que la construction des modèles s'est fait en s'appuyant sur différents travaux réalisés à une échelle plus macroscopiques [100,116]. Le choix s'est ainsi porté sur des échantillons contenant une répartition arbitraire de torons, dont la densité surfacique moyenne est celle du taux nominal. L'objectif des travaux est en partie de déterminer l'influence de cette répartition de torons sur l'endommagement de l'échantillon et son usure. Une des différences majeures avec le VE étudié dans la thèse de Nhu [112] et de devoir travailler avec un VE constitué de deux phases (torons et matrice) et donc d'une interphase (interface toron/matrice). Comme précédemment va alors se poser alors la question de la représentativité du VE, représentativité risquant d'être liée au rapport de la longueur des inclusions sur la hauteur de la cellule étudiée. Ce seront des indicateurs mécaniques et tribologiques (frottement, débit source) qui nous servirons d'indicateur de "convergence".

Utilisant notre méthode discrète comme méthode sans maillage (i.e. discrétisation d'un volume donné), l'influence de la distribution des centres des éléments sur les résultats macroscopiques a du être étudiée. Les géométries utilisées comme VE ont été discrétisées en utilisant dix empilements différents permettant ainsi d'obtenir des courbes d'évolution moyennes et d'y associer des barres d'erreurs sur des grandeurs comme l'endommagement, le débit source ou encore la contrainte déviatorique subit par les premiers et troisième corps.

On peut ainsi observer sur la Figure 4.3 que quelque soit la discrétisation utilisée, la tendance moyenne est la même avec des écarts types restant faible. Ceci nous permet donc d'affirmer que quelque soit la discrétisation utilisée, la courbe d'évolution est représentative avec une dispersion qui reste suffisamment faible.

Se pose ensuite la question de la représentativité du volume élémentaire nécessaire à ce type d'investigations numériques. Pour répondre à cette question, nous avons re-

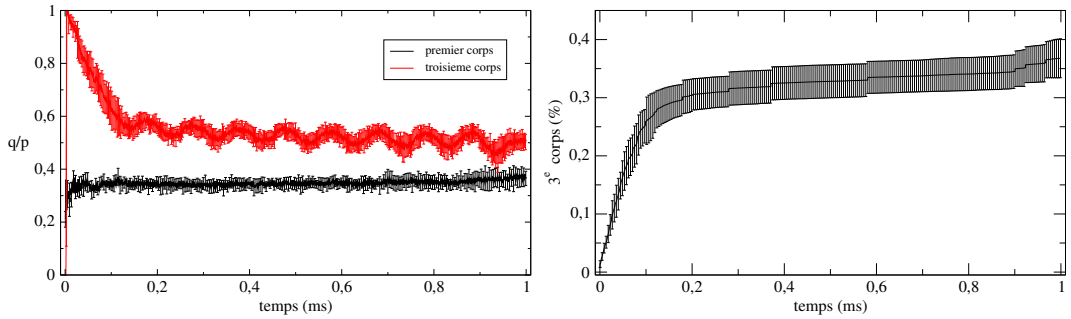


Figure 4.3 – *Evolution du frottement (vu comme le rapport des contraintes deviatoriques et hydrostatiques) et du volume de troisième corps obtenus après une moyenne réalisée sur dix échantillons.*

produit la méthodologie développée dans la thèse de C. Mbodj [100], proposant une euristique pour déterminer un VER sous sollicitations tribologiques en utilisant une approche éléments finis. La démarche se décompose en deux étapes. Lors de la première étape des essais de traction/compression sont réalisés sur des assemblage de VE jusqu'à obtenir une convergence des propriétés mécaniques (en fonction de critères donnés). Une fois cette convergence statique obtenue, la représentativité de l'assemblage de VE est testé sous sollicitations tribologiques en se basant sur de nouveaux critères. Si la convergence n'est pas atteinte, le nombre de VE est augmenté et dans le cas contraire, le VE obtenu devient alors le VER sous sollicitations tribologiques.

Cette procédure est reproduite dans la thèse de M. Champagne. Seule la caractérisation tribologique est présentée ici, en utilisant comme critère la valeur moyenne du frottement macroscopique, en présence ou non de débit source, ainsi que le volume de troisième corps généré.

		n_H		
		1	2	3
n_L	1	0.151	0.280	0.227
	2	0.159	0.195	
	3	0.156		0.193

Table 4.1 – *Mesure du frottement macroscopique en régime stationnaire pour les différents VE (n_L et n_H représentent respectivement le nombre de cellule en longueur et en hauteur).*

Le tableau 4.1 présente les différentes valeurs du frottement macroscopique mesurées en régime stationnaire pour les différents VE. Lorsqu'une seule cellule est utilisé en hauteur, l'augmentation du nombre de cellule en longueur ne modifie que très peu la valeur du frottement mesuré. Ceci peut s'expliquer par un effet de bord induit par le premier corps supérieur rigide ne favorisant pas l'accommodation de la déformation. Lorsque l'on passe à deux cellules ou plus en hauteur, la variation du frottement est plus notable et elle laisse supposer d'une seule cellule en largueur n'est pas suffisant. Le résultats intéressant est que le passage de 2×2 cellules à 3×3 cellules ne modifie que

de 1 % la valeur du frottement, soulignant la possible convergence attendue.

Pour compléter cette supposition, la Figure 4.4 présente l'évolution du nombre de particules de troisième corps rapporté à la longueur de l'échantillon est tracée pour les différents jeux de cellules.

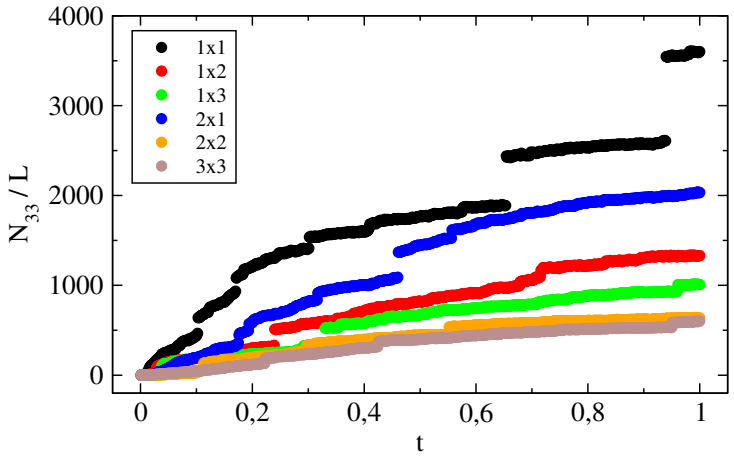


Figure 4.4 – *Evolution du nombre de particules de troisième corps en cours de simulation pour les différents VE.*

Sans surprise, le VE le plus petit est celui qui s'endommage le plus, car le plus contraint. L'augmentation du nombre de cellules, aussi bien en longueur qu'en hauteur, a pour effet de diminuer la création de particules de troisième corps, l'augmentation en hauteur étant plus favorable à cette diminution. Ce qui est encore une fois intéressant, est de voir qu'avec ce critère, le passage de 2×2 cellules à 3×3 cellules ne modifie que très peu l'évolution de l'endommagement (on peut voir l'état final de chaque simulation sur la Figure 4.6).

Il est donc possible d'obtenir un VER satisfaisant différents critères "tribologiques". Dans le cas des travaux de thèse de M. Champagne la combinaison 2x2 est la combinaison optimale. Il est intéressant de noter que si obtient une convergence en terme de "valeurs", les tendances globales (au sens impact des paramètres locaux sur les VE) restent les mêmes. L'utilisation de VE plus petits permet ainsi de faire une étude préliminaire pour dégager des tendances qu'il faut valider par des simulations avec le VER choisi.

Une fois la convergence numérique obtenue, le modèle est utilisé comme outil de compréhension dans l'étude des phénomènes et des mécanismes d'endommagements des composites C/C sous sollicitations tribologiques. Plusieurs points de comparaison peuvent être réalisés entre résultats expérimentaux et numériques.

Pour commencer, l'endommagement d'un volume élémentaire peut être regardé aussi bien au niveau de l'interface que du volume, avec une compétition constante entre premier et troisième corps.

Au niveau de l'interface, les particules peuvent s'arracher individuellement ou par agglomérats provenants de la matrice ou des torons, comme par exemple la décohésion de petits torons débouchants. Ces détachements peuvent s'apparenter au cas du polissage.

Au niveau, du volume les fissurations se produisent principalement à l'interfaces toron/matrice, préférentiellement à proximité de la surface frottante. Les torons et leurs

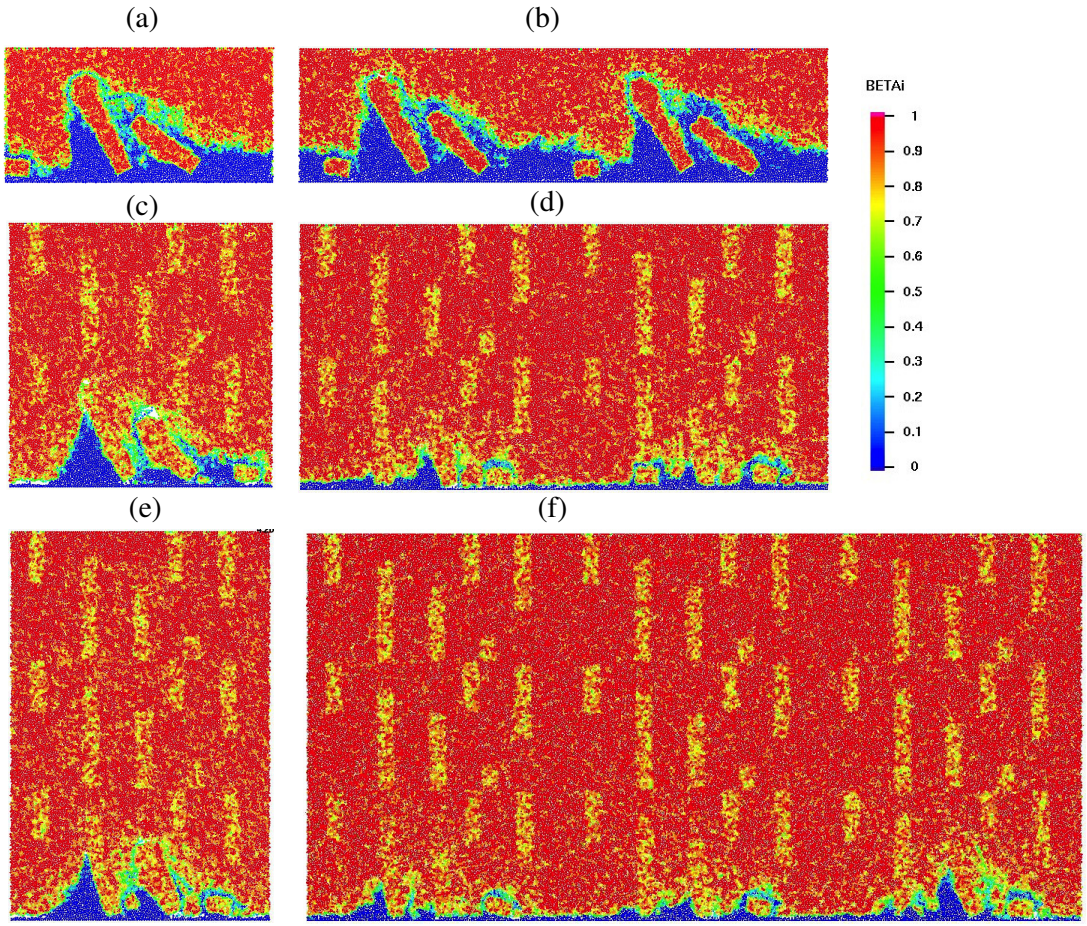


Figure 4.5 – *Visualisation de l'endommagment au travers de la variable β_i en fin de simulation pour les VE (a) 1x1, (b) 1x2, (c) 1x3, (d) 2x1, (e) 2x2 et (f) 3x3.*

interfaces sont des lieux de contraintes importantes, déjà mis en évidence par des modèles numériques par éléments [100]. Dans le matériau réel, ces interfaces sont également déjà fissurées lors de l'entrée en service du matériau à cause du traitement thermique de process.

Lors du cisaillement des effets surface-volume peuvent se produire comme celui proposé par la Figure 4.6.

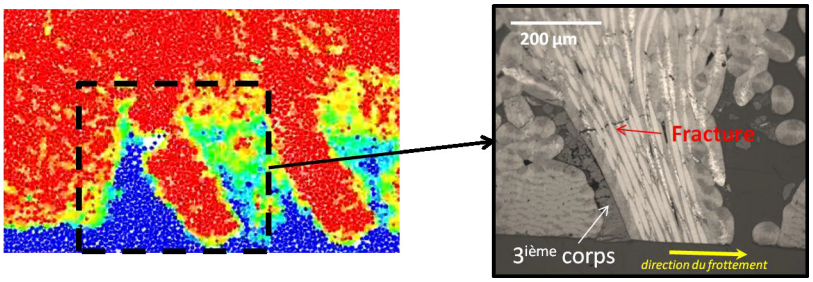


Figure 4.6 – *Paralléle numérique/expérimental illustrant la fissuration d'un toron sollicité en flexion du à un effet de coin du troisième corps.*

Si les torons sont suffisamment grand, il peuvent s'accommoder élastiquement sous les effets cumulés de la pression et du cisaillement, et venir "racler" la paroi mobile. De ce fait, le troisième corps détaché se trouve bloqué en amont du toron, créant une surcontrante locale (ce phénomène est amplifié par le caractère bi-dimensionnel des simulations). Le troisième corps s'accumulant va alors venir jouer le rôle d'un indenteur et supprimer la liaison toron/matrice, venant solliciter le toron en flexion. Lorsque cette sollicitation est trop importante, une fissuration peut apparaitre et occasionner le détachement d'une gros amas.

D'autres comparaisons pourraient être réalisés, mais nous invitons le lecteur à lire les travaux de thèse de Champagne [32, 33] pour avoir une vision plus globale de l'étude de l'endommagement des composites C/C sous sollicitations tribologiques.

4.2.3.2 Aspects thermiques

Dans la section consacrée à la rhéologie des troisième corps nous avions souligné l'importance de prendre en compte les aspects thermiques. Il en va de même lorsque l'on s'intéresse à la transition premier corps / troisième corps. En effet, si l'on s'intéresse en plus à la génération et la conduction de chaleur en présence de débit source, il faut pouvoir décrire correctement les phénomènes de conduction et génération (a minima) dans les premiers et troisième corps. Cependant, il s'avère impossible d'utiliser directement les modèles thermiques discrets présentés précédemment du moins pour représenter les premiers corps. En effet, sans adaptation du modèle, la diffusion de la chaleur dans un milieu "mécaniquement" équivalent se ferait beaucoup plus lentement, car la conduction locale se baserait sur la notion de force au contact pénalisant ainsi la conduction dans le milieu. Il est donc primordial d'adapter la méthode pour pouvoir décrire correctement les phénomènes de conduction et de génération de chaleur dans un milieu dégradable comme présentés dans les sections précédentes.

Cet objectif se retrouve dans les travaux de thèse de J. Rivière [134] qui propose une méthodologie pour écrire proprement la conduction de la chaleur dans un milieu continu équivalent. Pour cela, il s'appuie sur une analogie entre le réseau de contact résultant du "maillage" discret et un schéma de différences finis.

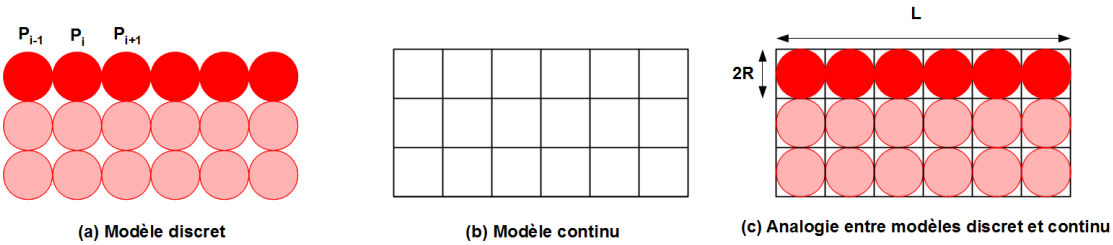


Figure 4.7 – *Milieu continu discrétisé par (a) des disques empilés, (b) un maillage régulier et (c) leur analogie.*

On peut ainsi décrire la température d'un noeud (c'est à dire d'une particule) de deux façons différentes : soit en utilisant l'approche présentée dans la section 2.3.3, soit par une approche continue type différences finies (cf. Fig. 4.7). Ainsi, en s'appuyant sur la section 2.3.3, la température d'une particule au sein du milieu est donnée par :

$$T_{i,j}^{+} = \left[1 - \frac{4dt}{\alpha_i}\tilde{H}\right] T_{i,j}^{-} + \frac{dt}{\alpha_i}\tilde{H}\left[T_{i-1,j}^{-} + T_{i+1,j}^{-} + T_{i,j-1}^{-} + T_{i,j+1}^{-}\right]. \tag{4.1}$$

L'évolution de la température en un point de la même plaque peut être également donnée par l'équation de la chaleur :

$$k_{th}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) = \rho c \frac{dT}{dt}, \tag{4.2}$$

où k_{th} représente la conductivité thermique du milieu, ρ, sa masse volumique et c, sa capacité calorifique. Une approximation de cette équation nous donne :

$$k_{th}\left(\frac{(T_{i+1,j}^{-} + T_{i-1,j}^{-} - 2T_{i,j}^{-})}{dx^2} + \frac{(T_{i,j+1}^{-} + T_{i,j-1}^{-} - 2T_{i,j}^{-})}{dy^2}\right) = \rho c \frac{T_{i,j}^{+} - T_{i,j}^{-}}{dt}. \tag{4.3}$$

Ici, dx et dy représentent la discrétisation spatiale et sont donc égaux à la distance centre à centre, soit $2R$. L'équation (4.3) se simplifie, conduisant à :

$$\Leftrightarrow T_{i,j}^{+} = \left[1 - \frac{dtk_{th}\pi}{\alpha_i}\right] T_{i,j}^{-} + \frac{dtk_{th}\pi}{4\alpha_i}\left[T_{i-1,j}^{-} + T_{i+1,j}^{-} + T_{i,j-1}^{-} + T_{i,j+1}^{-}\right]. \tag{4.4}$$

De ce fait, par analogie entre les modèles discret et continu, représentés par les équations (4.1) et (4.4), on en déduit que :

$$\tilde{H} = \frac{k_{th}\pi}{4}. \tag{4.5}$$

Il est intéressant de noter que la conductance au contact $\tilde{H}$ ne fait intervenir apparemment aucun paramètre concernant la microstructure du milieu. Toutefois cette analogie n'a de sens que pour un empilement (discrétisation) carré. En utilisant d'autre type d'empilement (hexagonal ou encore aléatoire), on peut obtenir des discrétisation plus dense avec un nombre de contact par particule plus important que 4 (empilement carré) et si le nombre de contacts augmente, l'analogie va en être perturbée. Pour corriger, ce problème Rivière [134] propose d'introduire le nombre de contact moyen N_c dans l'équation (4.6) de la façon suivante :

$$\tilde{H} = \frac{k_{th}\pi}{N_c}. \tag{4.6}$$

Grâce à cette expression de H, il fait coïncider les résultats concernant l'échauffement d'un barreau obtenus avec l'approche discrète et ceux obtenus avec une approche par éléments finis (cf. Fig. 4.8). Un échantillon de $3 \times 3\ mm$ est généré via trois empilement différents (carré, aléatoire et hexagonal). La paroi supérieure est portée à 300° K et la température du milieu est mesurée en deux points du milieu situés à 0.75 mm (point (a)) et 2.25 mm (point (b)).

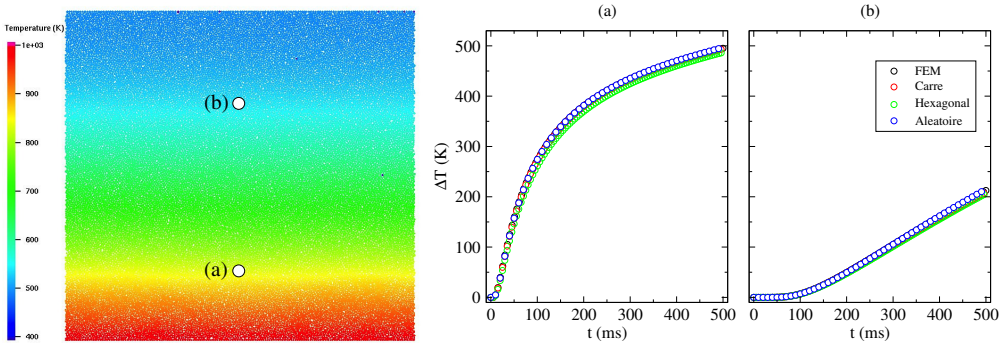


Figure 4.8 – *Evolution de la température mesurée en deux points (situés à a) 0.75 mm et b) 2.25 mm) d'un milieu généré via trois empilement différents (carré, aléatoire et hexagonal).*

Les courbes d'évolution de la température sont comparées à un modèle FEM. On observe une très bonne concordance entre les différentes courbes, assurant ainsi que le modèle développé permet de reproduire les effets de conduction dans un milieu continu équivalent.

Cette caractérisation étant réalisée, il est alors possible d'étudier le comportement thermomécanique des échantillons utilisés dans la thèse de M. Champagne [32], étude qui fera l'objet du manuscrit de J. Rivière.

4.3 Pour un dialogue entre échelles

La stratégie de coupler directement approches discrète et continue au sein d'une même simulation est très couteuse en temps de calcul, temps en grande partie fonction

de la taille de la structure et de ses discrétisations spatiale et temporelle ainsi que de la taille des éléments discrets et les lois d'interaction impliquées. L'utilisation de cette stratégie reste donc délicate dans des applications d'ingénierie sans faire un réel effort d'optimisation, effort pouvant se porter aussi bien sur l'utilisation du calcul parallèle que sur le développement d'algorithmes dédiés.

Donc en parallèle de ce type de simulations nous avons proposer dans le cadre de la thèse de V.-H. Nhu [112] et du projet ANR DiNEET [129], une approche s'apparentant à une méthode d'homogénéisation au contact en faisant dans un sens, remonter de l'échelle microscopique des grandeurs moyennes vers l' échelle des corps en contact pour s'en servir comme paramètre locaux, et dans l' autre sens, redescendre de l'échelle macroscopique des données locales pour s'en servir comme conditions limites à l'échelle microscopique.

Cette approche s'apparente aux approches multi-échelles FEM^2 [56] utilisant des simulations éléments finis à une échelle micro pour déterminer des paramètres de loi de comportement à l'échelle macro. Ici l'approche diffère légèrement puisque chaque échelle est associée à des méthodes (élément finis/éléments discrets) mais aussi des descriptions (continue/discrète) différentes.

Pour mettre en place cette approche, on utilise comme cas de référence un parallélépipède rigide frottant sur une surface rigide, modèle utilisé dans la thèse de V. Linck [**?**]. A l'échelle macroscopique, le premier corps supérieur est considéré déformable (modèle FEM) et soumis à une charge normale. Le premier corps inférieur est parfaitement rigide et est animé d'une vitesse tangentielle. Des conditions de raccords périodiques sont utilisées sur le premier corps supérieur dans les sens de l'écoulement liant ainsi le déplacement des noeuds aux extrémités droite et gauche. A l'échelle du troisième corps, la stratégie présentée dans la section 4.2 est appliquée sur un volume dont la taille est égale à celle d'une maille du modèle FEM.

Dans ses travaux de thèse V.-H. Nhu réalise, aux échelles locales et globales, une analyse détaillée afin de comprendre les comportements locaux et globaux. En particulier dans ces analyses, sont reliés régimes d'instabilités et frottement local (échelle macro) ainsi que frottement moyen et cohésion locale (échelle micro). En plus de cette analyse, qui n'est pas détaillée ici, des premiers essais de dialogue sont testés

Les conditions limites des simulations à l'échelle micro sont réalisées à force normale et vitesse de cisaillement constantes. Ces conditions peuvent alors s'apparenter à un état global de pur glissement (cf. Fig. 4.9). Mais si l'on focalise sur un petit volume de contact, comme il est proposé de le modéliser dans la section précédente, ces conditions n'ont aucune raison d'être constantes. La vibration de la structure va induire des variations au niveau de la force normale et de la vitesse relative au contact (cf. Fig. 4.9) conduisant à des phénomènes de type stick-slip.

Dans le but de prendre en compte des effets issus de l'échelle macro, il est intéressant d'introduire des variations dans l'évolution des conditions limites et de voir ainsi l'impact sur la rhéologie de l'interface. Cependant, pour être rigoureux dans la démarche que nous mettons en place, il faut souligner un point important. Les différents régimes d'instabilités obtenus et présentés sur la Figure 4.9 sont obtenus, au niveau macroscopique, pour différentes valeurs de frottement. Ainsi en référence à la l'étape de caractérisation proposée précédemment, à un couple (f_n, v_t), on peut associer un volume élémentaire permettant de retrouver la bonne valeur de frottement initial au travers de la cohésion

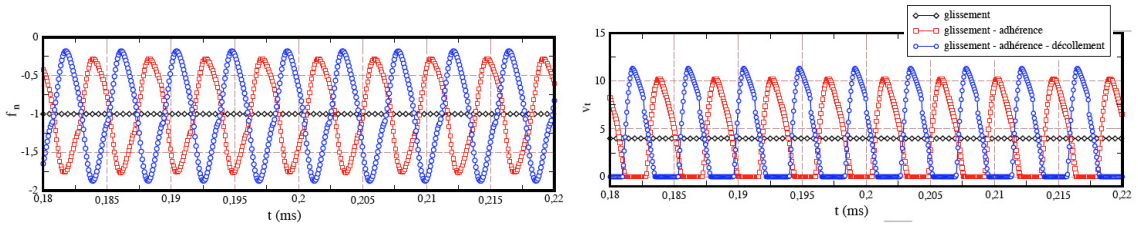


Figure 4.9 – *Evolution de la force normale et de la vitesse tangentielle en un noeud proche du contact pour différentes valeurs de frottement local.*

γ .

Dans ses travaux de thèse [112], Nhu a regardé l'impact de ces variations en termes de frottement macroscopique et de rhéologie du troisième corps pour différentes caractérisation surfacique mettant en jeu différents régimes d'instabilité de contact. De ses résultats, il est intéressant de revenir sur deux aspects.

Le premier concerne la rhéologie de l'interface. En effet, les sollicitations introduisent conduisent à l'obtention d'un troisième corps non uniforme. On peut alors analyser ce comportement en fonction du statut de contact correspondant à la sollicitation. En statut glissant (cf. Fig. 4.10a), on est en présence d'un troisième corps compact qui accommode le différentiel de vitesse entre les deux premiers corps.

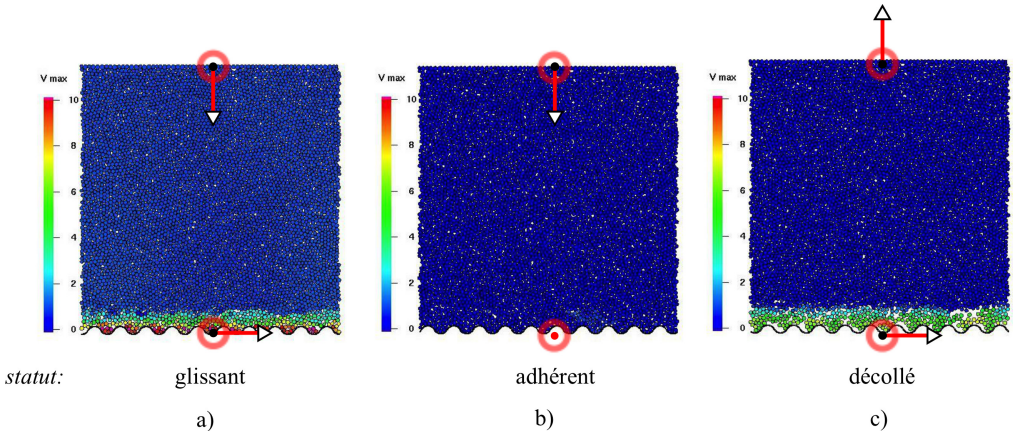


Figure 4.10 – *Visualisation du champ de vitesse d'un modèle dégradable soumis à des conditions limites variables : correspondance entre les statuts de contact glissant (a), adhérent (b) et décollé (c)*

En statut adhérent (cf. Fig. 4.10b), la vitesse relative est nulle et le troisième corps reste dense et statique. Enfin, en statut décollé (cf. Fig. 4.10c), le troisième corps accommode de nouveau le différentiel de vitesse mais il est moins sollicité qu'en statut glissant car la force normale appliquée ne travaille pas en compression. Il en résulte un troisième corps moins dense qui présente une compacité beaucoup plus faible que dans le cas du glissement. Ceci souligne l'importance des sollicitations globales sur la rhéologie du troisième corps. Les effets dynamiques introduits perturbent le caractère homogène de l'échelle locale conduisant à des contact entre premiers corps séparés, non pas par une couche homogène mais plutôt par des îlots porteurs de troisième corps.

Le deuxième aspect concerne l'évolution du coefficient de frottement moyen. Si l'on regarde celle-ci (cf. Fig. 4.11), on observe que tant que les instabilités n'ont pas perturbé à la fois l'évolution de la force normale et l'évolution de la vitesse de cisaillement, le frottement moyen reste constant. Dès que le couple (f,v) est perturbé, on observe de forte variation du frottement.

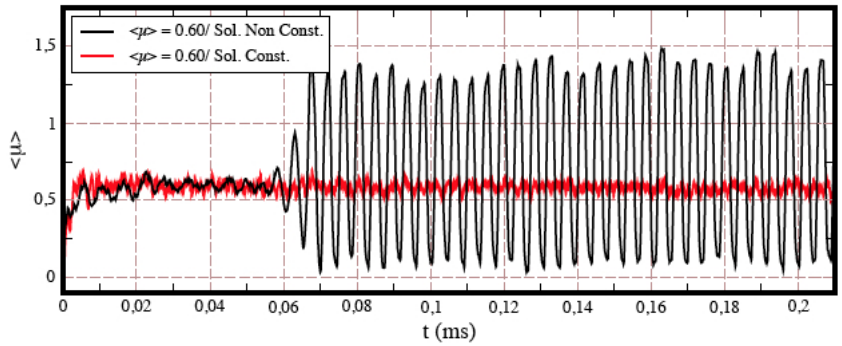


Figure 4.11 – *Evolution du coefficient de frottement moyen*

Si on s'intéresse à cet aspect, ce n'est pas tant pour les variations mais sur les valeurs résultantes. En effet, si l'on revient à l'idée de départ, on souhaite faire dialoguer les deux échelles en utilisant la cinématique locale à l'échelle macro comme conditions limites à l'échelle micro, puis se servir de grandeurs moyennes de l'échelle micro comme paramètre local à l'échelle macro. Ce dernier point nous permet de nous interroger sur la valeur de frottement à remonter à l'échelle macro qui est calculée classiquement comme le rapport F_t/F_n. Mais cette mesure conduit à des valeurs nulles (!) car F_t résulte du mouvement relatif entre les deux corps en contact (en présence ou non de troisième corps), l'absence de mouvement conduisant à une résultante tangentielle nulle ou quasi nulle. La valeur qui doit donc être remontée à l'échelle macro ne doit pas provenir d'une valeur moyenne mais plutôt d'une caractérisation faite à l'échelle micro prenant en compte la dégradation de l'interface. Il faut donc pouvoir à l'échelle macro garder une trace de l'état de surface par le biais de variable interne caractérisant par exemple un état de dégradation de l'interface.

CHAPITRE 5

Une alternative à Archard ?

Les trois parties de cette synthèse scientifique ont permis de proposer une vision numérique des concepts de triplet et circuit tribologique [18,67] en y intégrant des aspects multi-physiques et multi-échelles. Dans l'articulation de cette synthèse, nous avons essayé de respecter la démarche scientifique mise en place, préférée à un simple enchaînement chronologique, ceci dans le but de pouvoir proposer une réflexion et des axes de recherche pour les années futures. En particulier, les différents chapitres permettent également de revisiter les notions de sites et mécanismes d'accommodation de vitesse [20] associée au concept de troisième corps (cf. Fig. 5.1).

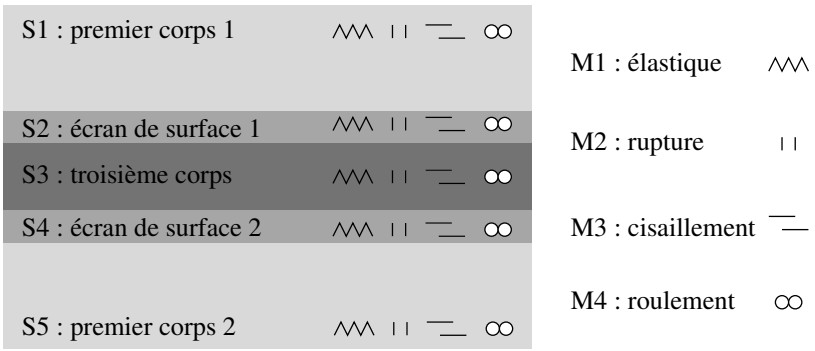


Figure 5.1 – *Définition des différents sites (S_i) et mécanismes (M_j) d'accommodation de vitesse [20] dans une interface tribologique.*

Pour rappel au travers des notions de sites et mécanismes d'accommodation de vitesse, Berthier *et al.* [20] proposent de décomposer les interfaces tribologiques en cinq sites notés S_i (i=1 : premier corps 1 ; i=2 : écran de surface 1, i=3 : troisième corps ; i=4 : écran de surface 2 ; i=5 : premier corps 2). Dans chaque site, quatre mécanismes d'accommodations des vitesses, notés M_j, sont définis : élastique (M_1), rupture (M_2), cisaillement (M_3) et roulement (M_4). Notons, que pour être rigoureux un sixième site doit être pris en compte ; il s'agit de du site S_0 lié au mécanisme [17].

Ainsi dans ce chapitre de synthèse, nous revenons dans chaque chapitre sur la notion de couple S_iM_j en faisant un parallèle avec les résultats obtenus, proposant ainsi des pistes et axes de recherche afin d'avoir un panorama de modèle le plus complet possible.

5.1 A court terme ...

5.1.1 Au coeur du troisième corps : le voyage fantastique !

Dans le Chapitre 2, nous sommes revenus sur les écoulements de troisième corps aussi bien d'un point de vue mécanique que multi-physiques, montrant qu'aujourd'hui les méthodes par éléments discrets étaient suffisamment matures pour être utilisées afin d'analyser la complexité d'une interface.

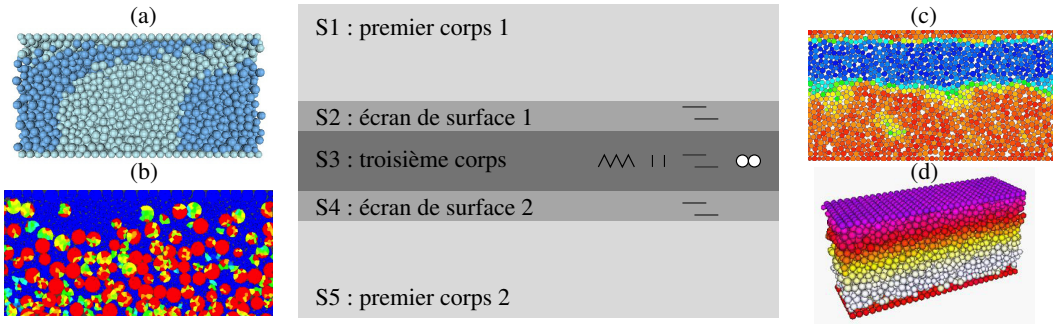


Figure 5.2 – *Couples S_iM_j rencontrés dans le cadre des écoulements de troisième corps aussi bien d'un point de vue mécanique que multi-physiques.*

Concernant les aspect purement mécanique, les couples S_3M_1, S_3M_3 et S_3M_4 sont clairement identifiables, les deux derniers étant inhérents à la méthode choisie ; les approches discrètes permettant de représenter naturellement le cisaillement et le roulement contrairement aux approches continues. Ces différents couples S_iM_j sont reliés aux paramètres des lois d'interactions choisies permettant d'avoir au travers de l'interface une réponse "élastique" et/ou une réponse "plastique" lors du cisaillement. Nous avons d'ailleurs vu dans la section 2.2 que le comportement macroscopique de l'interface dépend des lois d'interaction entre éléments. Différents paramètres et méthodes ont été comparés, mais il reste aujourd'hui à identifier le rôle de la viscosité ou du manière plus générale des termes dissipatifs dans ce type d'écoulement. C'est un travail qui demande à la fois une étude minutieuse car la dissipation peut apparaitre au travers des composantes normales et tangentielles des modèles locaux mais peut-être couplée aux effets cohésifs.

Le couple S_3M_2 n'est également plus un obstacle puisqu'il est aujourd'hui possible de modéliser l'écoulement de particules "fragmentables". Ce travail, encore inachevé (cf. Fig. 5.2b), va permettre d'enrichir la description des interfaces en prenant en compte un nouveau mécanisme dissipatif au travers de la fragmentation.

Nous avions fait en introduction un parallèle entre particules réelles et particules numériques, en soulignant le fait que dans nos travaux nous travaillons plus à "volumes équivalents" qu'à particule équivalente, car nous étions incapables de caractériser une particule réelle. Grâce au progrès fait dans les différentes techniques expérimentales (manipulations aux échelles micro ou sub-micro), il paraît envisageable aujourd'hui de procéder à ce type de caractérisation. Bien entendu il ne s'agit pas de venir manipuler des particules dans le contact, mais plutôt hors du contact, sous atmosphère contrôlée

par exemple, afin d'altérer le moins possible leurs propriétés. Ce travail, purement expérimental, devrait apparaître en parallèle de la thèse de Maria Daniela Villavicencio en collaboration avec Aurélien Saulot et Guillaume Colas.

En parallèle du point précédent, on peut également faire de l'identification numérique avec des méthodes de type Dynamique Moléculaire en réalisant des essais mécaniques à l'échelle atomique pour identifier des paramètres de loi de comportement. Cette méthodologie, entreprise lors de l'ANR DiNEET [129], nous a déjà permis de pointer les difficultés liées à ce type d'approche (définition et composition du modèle atomique, passage nano-micro,...). Il faut maintenant faire face à ces difficultés pour éventuellement pouvoir faire un parallèle avec une identification expérimentale.

Concernant les aspects multi-physiques, des perspectives apparaissent aussi bien pour les aspects électriques, thermiques que physico-chimiques.

Les aspects électriques traités d'un point de vue phénoménologique doivent aujourd'hui être re-visités avec des considérations plus quantitatives afin de pouvoir les utiliser dans un contexte plus industriel. Ce travail est actuellement entrepris dans la thèse de Chaoqun Zeng où une réflexion est faite sur les différents modèles électriques locaux pouvant être utilisés et leur impact sur des grandeurs globales (comme par exemple la résistance électrique de l'interface et le *bruit* électrique, signal se superposant à la valeur moyenne de la résistance).

D'un point de vue théorique, le modèle mécano-électrique développé repose sur un enchainement des effets mécaniques et électriques. Il serait intéressant de pouvoir écrire un vrai modèle couplé, où les aspects mécaniques et électriques sont résolus simultanément. Ce travail algorithmique permettrait de rendre plus robuste l'approche développée, en supprimant la problématique de "la poule et de l'oeuf" : est ce que la résolution du problème mécanique puis du problème électrique est équivalente à la résolution du problème électrique puis mécanique ? [1] Cette équivalence étant souvent avérée pour des petits pas de temps, elle pourrait être ainsi étendue à de grand pas de temps, et représenter ainsi une solution supplémentaire à la recherche de l'optimisation numérique des méthodes discrètes. Cette interrogation se pause également pour l'écriture des modèles thermomécaniques discrets.

Concernant justement les aspect thermomécaniques, différentes perspectives sont également identifiées. La première, qui devrait voir le jour dans la thèse de Jérôme Rivière, est d'extrapoler les résultats obtenus à la notion de résistance thermique au contact et ainsi proposer un modèle prenant en compte le circuit tribologique. De plus dans nos modèles, les effets radiatifs ont été négligés et il serait intéressant de quantifier l'erreur liée à cette hypothèse. Un des meilleurs arbitres sera certainement le dispositif expérimental développé par Jérôme Rivière dans sa thèse, qui nous permettra de valider les différentes hypothèses du modèle.

Viennent pour finir les considérations physico-chimiques, modèles pour lesquels le recul est le moins important. Ces dernières nous permettent de prendre en compte les couples S_2M_3/S_4M_3 reliés aux écrans de surfaces. Ils n'interviennent ici comme condi-

1. Il s'agit là également d'un questionnement expérimental, voire d'un questionnement scientifique tout simplement, de savoir quel effet physique est à l'origine de tel ou tel phénomène, et dans beaucoup de cas la réponse n'est pas simple.

tions limites en prenant en compte les aspects liés au cisaillement (activation / désactivation). Ces modèles développés avec une "phénoménologie de mécanicien" doivent continuer d'être enrichis afin que cette phénoménologie puisse parler un peu plus à des chimistes. Ce travail entrepris lors de l'ANR FReIN doit être poursuivi et être étendu, par exemple, aux problèmes de tribo-corrosion [45, 105], au travers de deux axes clairement identifiés. Le premier concerne les modèles locaux couplant actions mécaniques et réactions physico-chimiques. La robustesse de la démarche doit-être assurée en s'appuyant sur différents cas modèles disponibles (ou pas !) dans la littérature. Le deuxième concerne la prise en compte des espèces chimiques au sein de l'interface. Cette démarche pourra en particulier s'appuyer sur les modèles de réseau de pores (ou PN pour Pore Network) [119] couplés récemment aux approches par éléments discrets [31]. Il sera ainsi possible de prendre en compte les relations mécanique/chimie et la diffusion des espèces chimiques au sein du milieu.

5.1.2 Interaction premier / troisième corps : l'effet papillon !

Dans le Chapitre 3, les méthodes DEM ont été couplées aux méthodes FEM pour étudier les interactions entre premiers et troisième corps. En plus du site S_3, associé aux mécanismes M_3 et M_4, ce couplage nous a permis de prendre en compte un nouveau site (S_1 ou par symétrie S_5) associé au mode M_1, mais également le couplage de différents modes attachés à différents sites.

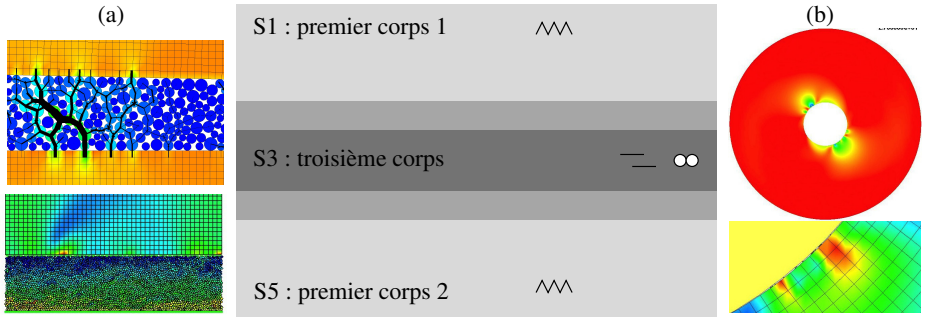


Figure 5.3 – *Couples S_iM_j rencontrés lors des interactions premier et troisième corps.*

De ce fait, les interactions entre premier et troisième corps nous ont permis de mettre en évidence des dépendances entre la rhéologie du troisième corps (profil de vitesse au travers de l'épaisseur du troisième corps et cohésion interne) et la déformation des premiers, ainsi qu'entre le débit d'usure et la propagation d'onde dans les premiers corps. Plus que mettre à défaut les approches classiques (sous entendu celles prenant un premier corps rigide), ce couplage a permis de souligner dans quel cadre elles restaient valides et les précautions à prendre avant d'extrapoler les différents résultats. La comparaison avec une expérience modèle nous à même permis de montrer qu'il était possible d'obtenir des résultats qualitatifs et ce à différentes échelles.

Toutefois vu les temps des simulations couplées, l'un des premiers travaux à réaliser est un travail d'optimisation conséquent afin de faire tomber la barrière liée au temps de calcul, et rendre l'utilisation de ces méthodes plus raisonnable pour des recherches

limitées en temps (... les thèses durant seulement trois ans !). Deux points en particulier peuvent être regardés : le parallélisme à mémoire distribuée et la mise en place d'algorithmes dédiés. Concernant le parallélisme, même si les architectures à mémoire partagée s'avèrent être efficace, leur scalabilité (gain en temps en fonction du nombre de processeurs) est loin d'être la plus optimale. Pour le calcul haute performance, dit HPC (pour *High Performance Computing*), les architectures à mémoire distribuée reste les plus prometteuses aussi bien pour les approches FEM [34] que DEM [157] et c'est donc en pensant à ce type d'architecture que les méthodes doivent être développées. Concernant la mise en place d'algorithmes dédiés, si cette approche paraît moins généralisable par définition, elle peut permettre de gagner en temps de calcul et intéresser en particulier les partenaires industriels qui s'intéresse à une application donnée.

Aujourd'hui le couplage FEM-DEM doit se poursuivre en explorant différentes voies. Dans un premier temps, le comportement des premiers corps doit être étendu à l'élasto-plasticité afin de voir l'impact des écoulements de troisième corps sur la surface des premiers corps et inversement (couple S_1M_3). Dans un second temps, l'introduction de la fragmentation au sein du troisième corps doit être envisagée afin de minimiser les pics de contraintes pouvant apparaître. Ce dernier point renvoie directement à la problématique des temps de calculs, puisque prendre en compte la fragmentation demande de faire un saut conséquent dans le nombre de particules à modéliser.

5.1.3 Transition premier / troisième corps : évolution !

Enfin le Chapitre 4, nous a montré la voie qui nous semble judicieux de suivre pour avoir à l'usure le problème de frottement. Cette voie consiste tout simplement à considérer les approches DEM comme des méthodes sans maillages et faire porter par les interactions l'information nécessaire et suffisante afin de trouver macroscopiquement un comportement continu équivalent.

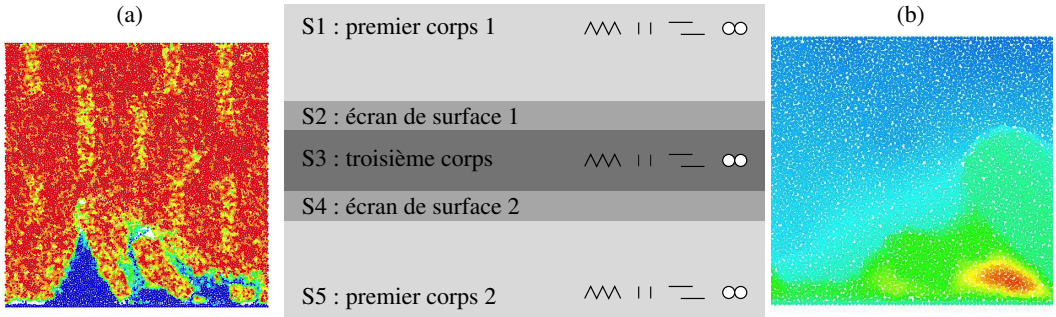


Figure 5.4 – *Couples S_iM_j rencontrés lors de la transition premier / troisième corps.*

Concernant les différents couples S_iM_j rencontrés, comme pour le Chapitre 2, les couples S_3M_j ($j \in \{1,4\}$) sont clairement identifiables. Cependant, de l'utilisation des méthodes DEM pour représenter les premiers corps, découle l'apparition presque naturelle des couples S_1M_j ($j \in \{1,4\}$). Pour les deux sites S_1 et S_3, les deux premiers mécanismes sont plus liés aux lois CZM utilisées (via la raideur au contact et l'énergie à rupture) tandis que les deux autres sont plus liés à la méthode choisie. Le fait de

pouvoir représenter une grande partie des couples S_iM_j nous conforte dans le choix de cette approche pour modéliser le comportement d'une interface tribologique. Les bonnes concordances entre approches numérique et expérimentale, obtenues lors des confrontations réalisées avec des observations et expériences sur des composites C/C, vont également en ce sens.

Aujourd'hui le premier travail à faire est de finir d'asseoir cette méthodologie pour les matériaux fragiles, notamment sur la notion de VER sous sollicitations tribologiques, et de prendre en compte débits d'usure et effet du mécanisme (nous n'oublions pas le site S_0 !) maintenant les corps en contact dans l'équilibre premier / troisième corps. Le passage au 3D apparaît également comme inévitable, mais il renvoi aussi à la problématique du temps de calcul évoqué précédemment, véritable point bloquant à ce jour.

Les modèles utilisés ne permettant pas une extension directe aux matériaux ductiles, les modèles CZM utilisés ne contenant pas de composante plastique, une réflexion sur quelle stratégie choisir pour une telle extension est a réaliser. Faut-il simplement travailler au niveau des lois d'interactions ou faut-il également opérer des changements dans la méthode elle-même (ajout d'interaction de second voisinage par exemple) ? [2]

L'extension de cette méthodologie dans un cadre multi-physiques doit également être poursuivit. Les thèses de Jérôme Rivière et Chaoqun Zeng devraient permettre de faire un pas significatif, respectivement pour les aspects thermiques et électriques. Seule (au sens des thèmes abordés dans nos travaux) l'extension aux aspects physico-chimique restera à faire. La stratégie proposée précédemment (couplage DEM / PN) semble être une piste intéressante pour commencer ce type de développement.

5.2 Horizon 2025 ...

Revenons maintenant sur la question évoquée dans le titre du chapitre en reprenant une remarque faite par Ludema [93] dans un article de 1996 (soit presque vingt ans !) comparant la lubrification fluide et la lubrification sèche. Il soulignait le fait que si la lubrification fluide était aujourd'hui une des sciences les plus développées, il ne fallait pas oublier qu'au temps de Reynolds (soit plus de 100 ans en arrière), elle se trouvait dans un état d'avancement proche de ce que l'on sait sur le frottement et l'usure aujourd'hui. Et il concluait sa remarque en espérant que *peut-être de bons modèles pour le frottement et l'usure permettront d'améliorer nos connaissances, comme la lubrification l'a fait dans le passé*. Cela peut paraître excessif de dire que l'on ne connait pas grand chose sur le frottement et l'usure, mais si l'on prend le problème à contre-sens, aujourd'hui il n'existe pas de modèle directement transposable d'un contact à un autre. C'est principalement pour cette raison qu'encore aujourd'hui, que dans tous les codes éléments finis, les modèles d'usure se base sur la loi d'Archard, en calant leur paramètres via des essais ou des abaques. Dans ce contexte là, existe-t-il alors aujourd'hui une alternative à la loi d'Archard pour modéliser l'usure ?

Oui elle existe et elle s'appuie en partie sur la démarche présentée dans ce mémoire, pour laquelle le concept de troisième corps est le moteur. Ce concept, basé sur du bon

2. Ces réflexions se retrouveront dans la thèse de Maria Daniela Villavicencio

sens, fait encore controverse aujourd'hui, alors qu'il est , il nous semble, le seul concept qui permet d'unifier les problèmes de tribologie.

Toutefois, cette alternative n'est pas encore "opérationnelle" pour principalement deux raisons :

- la première est que le mise en place numérique du concept évoqué précédemment (c.f. l'illustration du Graal tribologique avec la Figure 1.1) est encore très lourde à mettre en place (mais réalisable) et ne permet pas de simuler des temps physiques raisonnables dans des temps CPU tolérables ;
- la seconde est qu'il n'existe pas (encore) de loi permettant de représenter ce concept au travers d'équations (comme celle de Reynolds pour la lubrification fluide).

Le premier point, déjà été évoqué mainte fois dans ce dernier chapitre, souligne encore une fois le verrou qu'est le temps de calcul. L'optimisation numérique de ces méthodes est plus que jamais d'une importance capitale pour sortir ces méthodes d'un cadre purement académique et ainsi pouvoir les valoriser davantage au niveau industriel. Cela ne sera qu'avec ce type de développement que nous pourrons étendre ses approches à la modélisation tri-dimensionnelle, déjà existante en statique [90] en couplant FEM et MD.

Le second concerne l'écriture des problèmes de contact frottant en présence d'usure d'un point de vue thermodynamique. Si cette idée n'est pas nouvelle [48–50], les modélisations développés aujourd'hui doivent permettre de revisiter et d'enrichir ces modèles. Ce type d'approche entre complètement dans l'approche générale cherchant à mettre au point une démarche prédictive du phénomène d'usure, utilisant un outil de simulation numérique et la méthode des éléments finis. Les modèles développés nécessite pour leur application l'évaluation de la contribution énergétique du troisième corps à la dissipation totale. Cependant, comme beaucoup de résultats présentés dans ces quelques pages, les travaux de la littérature ne considèrent pas un modèle de contact global, sous entendu une volume séparant deux corps vue comme une association de volume élémentaire sans troisième corps et d'autre avec une quantité plus ou moins importante. Donc plus qu'une application directe des principes de la thermodynamique, c'est une fusion de cette dernière avec le concept de circuit tribologique qui faut opérer afin de faire tomber les derniers verrous.

Epilogue

Après la lecture de ces quelques pages, j'espère que cette rencontre numérique avec le "troisième corps", vous aura convaincu de l'importance de continuer à développer les outils numériques et les approches sur lesquels ces derniers s'appuient pour arriver à résoudre les problèmes de frottement et d'usure.

Je voulais finir en ouvrant une parenthèse vers ce qui me semble être la sociologie. Nous avons vu que le concept de triplet tribologique s'appliquait parfaitement à des problèmes de contact : deux corps en contact, séparé par un troisième, le tout maintenu par un mécanisme. Mais n'est ce pas également une conceptualisation de notre société ? Ne sommes nous tous pas, en tant qu'être humain, des premiers corps qui interagissent continuellement au travers d'échanges divers et variés (troisième corps) et qui évoluent dans un système socio-économique avec de nombreuses strates (administrative, familiale, culturelle) qui représente le mécanisme ? N'essayons nous pas d'accommoder du mieux possibles nos échanges divers et variés, le tout en dissipant le moins d'énergie possible ?

Alors à quand l'émergence la tribo-sociologie pour répondre à ces questions ?

Annexe A : PhotoTrib

Le dispositif expérimental *PhotoTrib* (cf. Fig. 5.5) a été développé afin de suivre simultanément les vibrations des premiers corps et l'évolution du troisième corps sous des conditions de contact frottant. Le système est composé d'un disque en polycarbonate maintenu en périphérie et d'un cylindre en acier. La pression de contact entre les éléments est contrôlée via la dilatation radiale du cylindre intérieur. Lorsque la pression souhaité est atteinte, le cylindre est mis en rotation, via un moteur électrique, afin d'atteindre une vitesse angulaire constante, notée ω.

Le disque étant en polycarbonate, matériau photo-elastique possédant des propriétés de birefringence, il est possible de réaliser une analyse des isochromes afin d'obtenir la visualisation dynamique du déviateur de contrainte (i.e. $|\sigma_1 - \sigma_2|$) en chaque point du disque tout au long du processus. Les isochromes peuvent être directement comparées à la composante déviatorique du tenseur de contrainte calculé dans les simulations numériques. Dans le dispositif PhotoTrib, un filtre mono-chromatique à été utilisé (longueur d'onde $\lambda = 546\ nm$) afin de sélectionner uniquement les isochromes proportionnelles à τ_{max} égal à $0.35\ MPa$ améliorant ainsi leur lisibilité.

Afin de contrôler les variations de température, un thermocouple a été utilisé proche de l'interface de contact. Il s'avère que dans les résultats présentés dans la suite, la valeur de cette température est comparable à la température ambiante, nous permettant de d'écarter la présence d'artefact thermique lors de l'observation des isochromes.

Les caractéristiques matériaux et géométriques sont résumés dans le Tableau 5.1.

Pour prendre en compte les hautes fréquences des vibrations instables d'un tel système, une caméra rapide a été utilisée avec une vitesse d'échantillonnage compatible

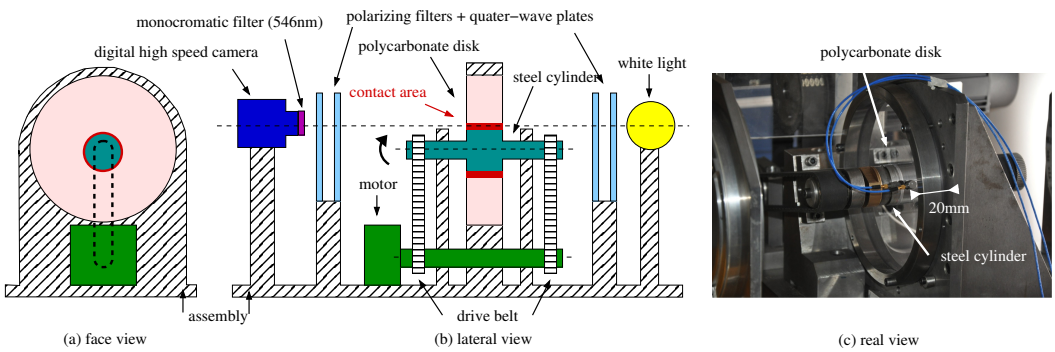


Figure 5.5 – *Parallèle entre le schéma du dispositif expérimental PhotoTrib de face (a) et de profil (b) et le dispositif réel (c)*

	Disque	Cylindre
Module d'Young (GPa)	2.3	205
Coefficient de Poisson	0.38	0.3
Densité ($kg.m^{-3}$)	1200	7800
Rayon interne (mm)	20.5	–
Rayon externe (mm)	92.5	20.5
Epaisseur (mm)	10	–
Constante de Brewster (Pa^{-1})	$78\ 10^{-12}$	–

Table 5.1 – *Caractéristiques matériaux et géométriques des éléments principaux du dispositif expérimental PhotoTrib*

avec la fréquence des instabilités (i.e. 20 000 fps pour 640x480 pixels). En complément, les accélérations du disques plan et hors-plan sont enregistrées via deux accélérateurs piézo-électrique d'une sensibilité de $10\ mV/g$ situés radialement à environ $20\ mm$ de l'interface disque-cylindre (Fig. 5.5). L'expansion radiale du cylindre en acier est pilotée par deux transducteurs de courant, d'une sensibilité de $8\ mV/\mu m$, diamétralement opposés.

Enfin, la vitesse de rotation du cylindre est imposée et contrôlée par un moteur Brushless relié à un encodeur optique. De ce fait le moment du moteur est directement proportionnel au moment résultant des forces de frottement se produisant à l'interface disque/cylindre.

Bibliographie

[1] A.S. Adamou, J. Denape, J.-Y. Paris, and E. Andrieu. An environmental tribometer for the study of rubbing surface reactivity. *Wear*, 261(3-4) :311–317, 2006. 51

[2] G. G. Adams. An intersonic slip pulse at a frictional interface between dissimilar materials. *ASME J. Appl. Mech.*, 68 :81–86, 2001. 45

[3] P. Alart. Méthode de Newton Généralise en Mécanique du Contact. *J. Math. Pures Appl.*, 76 :83–108, 1997. 45

[4] M. P. Allen and D. J. Tildesley. *Computer Simulations of Liquids*. Clarendon Press, Oxford, 1987. 52

[5] G. Anciaux and J.-F. Molinari. Contact mechanics at the nanoscale, a 3D multiscale approach. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 79 :1041–1067, 2009. 46

[6] E. Antaluca. *Contribution à l'étude des contacts élasto-plastiques - effet d'un chargement normal et tangentiel*. PhD thesis, INSA-Lyon, 2006. 44

[7] G. Antoni, T. Désoyer, and F. Lebon. A combined thermo-mechanical model for Tribological Surface Transformations. *Mech. Mater.*, 49 :92–99, 2012. 55

[8] J. F. Archard. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *ASME J. Appl. Phys.*, 24(8) :981–988, 1953. 41

[9] J. F. Archard. Elastic Deformation and the Contact of Surfaces. *Nature*, 172(4385) :918–919, 1953. 41

[10] E. Azéma and F. Radjaï. Internal Structure of Inertial Granular Flows. *Phys. Rev. Lett.*, 112(7) :078001, 2014. 54

[11] K. Bagi. Stress and strain in granular assemblies. *Mech. Mater.*, 22(3) :165–177, 1996. 55, 84

[12] M.-C. Baietto, J. Rannou, A. Gravouil, H. Pelletier, C. Gauthier, and R. Schirrer. 3D crack network analysis during a scratch test of a polymer : A combined experimental and multigrid X-FEM based numerical approach. *Tribol. Int.*, 44(11) :1320–1328, 2010. 45

[13] P. Ballard. Dynamique des systèmes méaniques discrets avec liaisons unilatérales parfaites. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 327 :953–958, 1999. 45

[14] H. Ben-Dhia. Problèmes mécaniques multi-échelle : la méthode Arlequin. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 326(Série II b) :899–904, 1998. 75

[15] Y. Ben-Zion. Dynamic ruptures in recent models of earthquake faults. *Journal of the Mech. and Phys. Solids*, 49 :2209–2244, 2001. 45

[16] P. Bernard and M. Renouf. Modélisation discrète de structures tissées. In *CSMA 2011*, pages 1–7, Giens (Var), 2011. 55

[17] Y. Berthier. *Effet du comportement du troisieme corps sur l'usure des paliers secs en mouvement alternatif*. PhD thesis, INSA Lyon, 1988. 100

[18] Y. Berthier. Experimental evidence for friction and wear modelling. *Wear*, 139 :77–92, 1990. 45, 47, 48, 49, 51, 100

[19] Y. Berthier. *Handbook of Materials Behavior models*, chapter Background, pages 676–699. Lemaître Academic Press, 2001. 41, 43, 74

[20] Y. Berthier, M. Godet, and M. Brendle. Velocity Accommodation in Friction. *Tribol. Trans.*, 32(4) :490–496, 1989. 51, 100

[21] Y. Berthier, P. Jacquemard, and M.-H. Meurisse. From Phenomenology to the Concepts which flow from the Third Body. Application to Radial Face Seal. In *The Third Body Concept*, pages 91–100, 1996. 50

[22] B. Bhushan, editor. *Modern Tribology Handbook*. Columbia Ohio, 2001. 43

[23] A. Bidiville, M. Favero, P. Stadelmann, and S. Mischler. Effect of surface chemistry on the mechanical response of metals in sliding tribocorrosion systems. *Wear*, 263(1-6) :207–217, 2007. 55

[24] H. A. Blok. The dissipation of frictional heat. *Appl. Sci. Res. A*, 5(2-3) :151–181, 1955. 64

[25] H. A. Blok. The flash temperature concept. *Wear*, 6 :483–494, 1963. 61, 64

[26] K. Bourbatache, M. Guessasma, E. Bellenger, V. Bourny, and J. Fortin. DEM ball bearing model and defect diagnosis by electrical measurement. *Mech. Syst. Signal Proc.*, 41(1-2) :98–112, 2013. 56

[27] F. P. Bowden and D. Tabor. *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford University Press, Clarendon Press, second edition, 1986. 41

[28] M. Busquet, S. Descartes, and Y. Berthier. Formation conditions of mechanically modified superficial structures for two steels. *Tribol. Int.*, 42(11-12) :1730–1743, 2009. 43, 55

[29] H.-P. Cao. *Modélisation par éléments discrets rigides et/ou déformables des milieux granulaires et des troisième corps solides*. PhD thesis, INSA-Lyon, 2011. 53, 75, 78

[30] H.-P. Cao, M. Renouf, F. Dubois, and Y. Berthier. Coupling Continuous and Discontinuous Descriptions to Model First Body Deformation in Third Body Flows. *ASME J. Tribol.*, 133(4) :041601, 2011. 78

[31] E. Catalano, B. Chareyre, and E. Barthélémy. Pore-scale modeling of fluid-particles interaction and emerging poromechanical effects. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 38 :51–71, 2014. 103

[32] M. Champagne. *Endommagement "utile" et "dialogue surface/volume" : Investigations numérique et expérimentale du comportement des composites C/C sous sollicitations tribologiques*. PhD thesis, Université de Lyon, 2013. 90, 94, 96

[33] M. Champagne, M. Renouf, and Y. Berthier. Modeling Wear for Heterogeneous Bi-Phasic Materials Using Discrete Elements Approach. *ASME J. Tribol.*, 136(2) :021603, 2014. 94

[34] L. Champaney, J.-Y. Cognard, D. Dureisseix, and P. Ladeve. Large scale applications on parallel computers of a mixed domain decomposition method. *Comput. Mech.*, 19 :253–263, 1997. 104

[35] T. Champelovier and M. Renouf. Modèle multi-physiques par éléments discrets Applications à la modélisation du troisième corps. In *CSMA 2009*, pages 665–670, 2009. 56, 62

[36] C. E. Chan-Tien. *Simulation numérique du comportement d'un film granulaire cisaillé en fonction de la "rugosité" des parois et de la "forme" des granules.* PhD thesis, INSA-Lyon, 1998. 46

[37] R. Charlery. *Comportements sous sollicitations tribologiques d'un matériau énergétique*. PhD thesis, INSA-Lyon, 2014. 55

[38] R. Charlery, M. Renouf, A. Saulot, N. Daly, and Y. Berthier. Experimental and numerical modelling of the ignition of solid propellant. *Tribol. Int.*, pages 1–13, 2014. 55

[39] G. Colas. *Utilisation raisonnée de contaminants pour caractériser la rhéologie des premiers et troisième corps solides*. PhD thesis, INSA-Lyon, 2013. 43

[40] A.-L. Cristol-Bulthe, Y. Desplanques, and G. Degallaix. Coupling between friction physical mechanisms and transient thermal phenomena involved in pad-disc contact during railway braking. *Wear*, 263(7-12) :1230–1242, 2007. 44

[41] J. Denape and N. Laraqi. Aspect thermique du frottement : mise en évidence expérimentale et éléments de modélisation. *Mec. Ind.*, 2139 :563–579, 2000. 61

[42] S. Descartes and Y. Berthier. Rheology and flows of solid third bodies : background and application to an MoS1.6 coating. *Wear*, 252(7-8) :546–556, 2002. 51, 66

[43] S. Descartes, M. Renouf, N. Fillot, B. Gautier, A. Descamps, Y. Berthier, and Ph. Demanche. A new mechanical-electrical approach to the wheel-rail contact. *Wear*, 265(9-10) :1408–1416, 2008. 56

[44] M. Di Bartolomeo, A. Meziane, F. Massi, L. Baillet, and A. Fregolent. Dynamic rupture at a frictional interface between dissimilar materials with asperities. *Tribol. Int.*, 43(9) :1620–1630, 2010. 45

[45] N. Diomidis and S. Mischler. Third body effects on friction and wear during fretting of steel contacts. *Tribol. Int.*, 44(11) :1452–1460, 2011. 103

[46] N. Douarche, D. Rouby, G. Peix, and J.-M. Jouin. Relations between X-ray tomography, density and mechanical properties in carbon-carbon composites. *Carbon*, 39(10) :1455–1465, 2001. 51

[47] D. Dowson. *History of Tribology*. Professional Engineering Publishing and, London and Bury St. Edmunds, England, 2nd editio edition, 1998. 41

[48] M. Dragon-Louiset. Modèles micromécaniques de l'interface d'un système tribologique dans une approche thermodynamique de l'usure continue. *Mec. Ind.*, 1(1) :37–42, 2000. 106

[49] M. Dragon-Louiset. On a predictive macroscopic contact-sliding wear model based on micromechanical considerations. *Int. J. Solid Struct.*, 38(9) :1625–1639, 2001. 106

[50] M. Dragon-louiset and C. Stolz. Approche thermodynamique des phénomènes liés à l'usure de contact. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 327(Série II b) :1275–1280, 1999. 106

[51] S. D. Dvorak, K. J. Wahl, and I. L. Singer. In situ analysis of third body contributions to sliding friction of a Pb-Mo-S coating in dry and humid air. *Tribol. Lett.*, 28(3) :263–274, 2007. 51

[52] A. Eleod, F. Oucherif, J. Devecz, and Y. Berthier. Conception of numerical and experimental tools for study of the Tribological Transformation of Surface (TTS). In D Dowson Et al., editor, *Lubrication at the Frontier*, volume 36 of *Tribology Series*, pages 673–682. Elsevier, 1999. 43

[53] H. G. Elrod and D. E. Brewe. Numerical Experiments with Flows of Elongated Granules. *Tribol. S.*, 21 :219–226, 1991. 46, 51, 54

[54] E. Falcon and B. Castaing. Electrical conductivity in granular media and Branly's coherer : A simple experiment. *Am. J. Phys.*, 73(4) :302, 2005. 59

[55] E. Falcon, B. Castaing, and M. Creyssels. Nonlinear electrical conductivity in a 1D granular medium. *Eur. Phys. J. B*, 38(3) :475–483, 2004. 59

[56] F. Feyel and J.-L. Chaboche. FE2 multiscale approach for modelling the elastoviscoplastic behaviour of long fibre SiC/Ti composite materials. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 183 :309–330, 2000. 97

[57] N. Fillot, I. Iordanoff, and Y. Berthier. A Granular Dynamic Model for the Degradation of Material. *ASME J. Tribol.*, 126(3) :606, 2004. 46

[58] N. Fillot, I. Iordanoff, and Y. Berthier. Simulation of Wear Through Mass Balance in a Dry Contact. *ASME J. Tribol.*, 127(1) :230, 2005. 46

[59] S. Fouvry, Ph. Kapsa, and L. Vincent. An elastic-plastic shakedown analysis of fretting wear. *Wear*, 247(1) :41–54, 2001. 44, 46

[60] L. Gallego. *Fretting et Usure des Contacts Mécaniques : Modélisation Numérique*. PhD thesis, INSA-Lyon, 2007. 44

[61] L. Gallego, D. Nélias, and S. Deyber. A fast and efficient contact algorithm for fretting problems applied to fretting modes I, II and III. *Wear*, 268(1-2) :208–222, 2010. 41, 44

[62] H. Gao, Y. Dong, and A. Martini. Atomistic study of lateral contact stiffness in friction force microscopy. *Tribol. Int.*, 74 :57–61, 2014. 46

[63] H. Garrido, O. Curadelli, and D. Ambrosini. Semi-active friction tendons for vibration control of space structures. *J. Sound Vib.*, 333(22) :5657–5679, 2014. 41

[64] A. Ghaouti, M. Chaze, P. Dubujet, and F. Sidoroff. Particulate and granular simulation of the third body behaviour. *Tribology S.*, 31 :355–365, 1996. 46

[65] O. Giannini and A. Sestieri. Predictive model of squeal noise occurring on a laboratory brake. *J. Sound Vib.*, 296(3) :583–601, 2006. 41

[66] E. Gnecco, R. Bennewitz, T. Gyalog, C. Loppacher, M. Bammerlin, E. Meyer, and H. Guntherodt. Velocity dependence of atomic friction. *Phys. Rev. Lett.*, 84(6) :1172–5, 2000. 42

[67] M. Godet. The third-body approach : a mechanical view of wear. *Wear*, 100(1-3) :437–452, 1984. 42, 45, 100

[68] A. Greco, S. Sheng, J. Keller, and A. Erdemir. Material wear and fatigue in wind turbine Systems. *Wear*, 302(1-2) :1583–1591, 2013. 56

[69] G. T. Ham, C. A. Rubin, G. L. Hahn, and G. V. Bharghava. Elasto-plastic finite element analysis of repeated, two-dimensional rolling sliding contacts. *ASME J. Tribol.*, 110 :44–49, 1988. 45

[70] K. Holmberg, P. Andersson, and A. Erdemir. Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribol. Int.*, 47 :221–234, 2013. 41

[71] T. J. R. Hughes. *The Finite Element Method*. Prentice-Hall, 1987. 86

[72] I. Iordanoff. Modélisation du comportement tribologique des 3e corps solides et gazeux, 2004. 52, 75

[73] I. Iordanoff, B. Seve, and Y. Berthier. Solid Third Body Analysis Using a Discrete Approach : Influence of Adhesion and Particle Size on Macroscopic Properties. *ASME J. Tribol.*, 124(3) :530, 2002. 54

[74] J. C. Jaeger. Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts. *Proc. R. Soc. N. S. W.*, 76 :205–224, 1942. 61, 64

[75] M. Jean. The non-smooth contact dynamics method. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 177(3-4) :235–257, 1999. 75

[76] M. Jean, V. Acary, and Y. Monerie. Non-smooth contact dynamics approach of cohesive materials. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 359 :2497–2518, 2001. 75, 90

[77] K. L. Johnson, K. Kendall, and A. D. Roberts. Surface Energy and the Contact of Elastic Solids. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 324(1558) :301–313, 1971. 66

[78] F. Jourdan. Numerical wear modeling in dynamics and large strains : Application to knee joint prostheses. *Wear*, 261(3-4) :283–292, 2006. 45

[79] F. Jourdan, P. Alart, and M. Jean. A Gauss-Seidel like algorithm to solve frictional contact problems. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 155(1-2) :31–47, 1998. 45

[80] C. P. Ju, J. H. Chern Lin, K. J. Lee, and H. H. Kuo. Multi-braking tribological behavior of PAN-pitch, PAN-CVI and pitch-resin-CVI carbon-carbon composites. *Mater. Chem. Phys.*, 64(3) :196–214, 2000. 55

[81] H. Kasem, S. Bonnamy, Y. Berthier, and P. Jacquemard. Fiber-matrix unbonding and plastic deformation in C/C composites under tribological loading. *Wear*, 269(1-2) :104–111, 2010. 44

[82] R. Komanduri and Z.B. Hou. Analysis of heat partition and temperature distribution in sliding systems. *Wear*, 251(1-12) :925–938, 2001. 61

[83] S. Lafon-Placette, K. Delbé, J. Denape, and M. Ferrato. Tribological characterization of silicon carbide and carbon materials. *J. Eur. Ceram. S.*, 35(4) :1147–1159, April 2015. 66

[84] N. Laraqi and A. Bairi. Theory of thermal resistance between solids with randomly sized and located contacts. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 45(20) :4175–4180, 2002. 61

[85] Y. Lavallée, T. Hirose, J.E. Kendrick, S. De Angelis, L. Petrakova, A.J. Hornby, and D.B. Dingwell. A frictional law for volcanic ash gouge. *Earth Planet. Sc Lett.*, 400 :177–183, 2014. 42, 51

[86] S. Leroy, A. Steinberger, C. Cottin-Bizonne, F. Restagno, L. Léger, and E. Charlaix. Hydrodynamic Interaction between a Spherical Particle and an Elastic Surface : A Gentle Probe for Soft Thin Films. *Phys. Rev. Lett.*, 108(26) :264501, 2012. 76

[87] S. C. Lim, M. F. Ashby, and J. H. Brunton. Wear-rate transitions and their relationship to wear mechanisms. *Acta Metall.*, 35 :1343–1348, 1987. 41

[88] V. Linck, L. Baillet, and Y. Berthier. Modeling the consequences of local kinematics of the first body on friction and on third body sources in wear. *Wear*, 255(1-6) :299–308, 2003. 45

[89] M. Liu and D. G. Corman. Formulation of Rayleigh damping and its extensions. *Comput. Struct.*, 57(2) :277–285, 1995. 77

[90] B. Luan, S. Hyun, J. Molinari, N. Bernstein, and M. Robbins. Multiscale modeling of two-dimensional contacts. *Phys. Rev. E*, 74(4) :1–11, 2006. 46, 75, 106

[91] A. A. Lubrecht and Y. Berthier. Granular Lubrication ; A simple model and trends. *Tribology S.*, 30 :53–62, 1995. 46

[92] A. A. Lubrecht, C. E. Chan-Tien, and Y. Berthier. A simple model for granular lubrication ; influence of boundaries. In D Dowson Et al, editor, *The Third Body Concept*, volume 31 of *Tribology Series*, 1995. 46

[93] K. C. Ludema. Mechanism-based modeling of friction and wear. *Wear*, 200 :1–7, 1996. 44, 105

[94] S. Luding, K. Manetsberger, and J. Müllers. A discrete model for long time sintering. *J. Mech. Phys. Solids*, 53(2) :455–491, 2005. 67

[95] D. Majcherczak, P. Dufrénoy, Y. Berthier, and M. Nait-abdelaziz. Experimental thermal study of contact with third body. *Wear*, 261 :467–476, 2006. 51

[96] A. Martini. Molecular Dynamics Simulation of Nanotribology. In *Micro- and Nanoscale Phenomena in Tribology*, pages 189–206. CRC Press, 2011. 46

[97] F. Massi, L. Baillet, O. Giannini, and A. Sestieri. Brake squeal : Linear and nonlinear numerical approaches. *Mech. Syst. Signal Proc.*, 21(6) :2374–2393, 2007. 45

[98] F. Massi, Y. Berthier, and L. Baillet. Contact surface topography and system dynamics of brake squeal. *Wear*, 265(11-12) :1784–1792, 2008. 45

[99] F. Massi, G. Giannini, and L. Baillet. Brake squeal as dynamic instability : An experimental investigation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 120(3) :1388–1399, 2006. 41

[100] C. Mbodj. *Rôle des paramètres matériaux et structuraux dans l'homogénéisation numérique des composites C/C - Cas des sollicitations tribologiques de freinage*. PhD thesis, INSA-Lyon, 2011. 90, 91, 94

[101] C. Mbodj, G. Peillex, M. Renouf, L. Baillet, and P. Jacquemard. Influence du contraste des propriétés élastiques des composites carbone / carbone (C / C) sous conditions dynamiques de contact frottant. *Mec. Ind.*, pages 1–6, 2010. 45

[102] H. C. Meng and K. C. Ludema. Wear models and predictive. *Wear*, 181-183 :443–457, 1995. 41

[103] Y.J. Mergler, R.J. Van Kampen, W.J. Nauta, R.P. Schaake, B. Raas, J.G.H. Van Griensven, and C.J.M. Meesters. Influence of yield strength and toughness on friction and wear of polycarbonate. *Wear*, 258(5-6) :915–923, 2005. 82

[104] GdR MiDi. On dense granular flows. *E. Phys. J. E*, 14 :367–371, 2004. 50

[105] S. Mischler and A. I. Muñoz. Wear of CoCrMo alloys used in metal-on-metal hip joints : A tribocorrosion appraisal. *Wear*, 297(1-2) :1081–1094, 2013. 103

[106] N. Möes, J. Dolbow, and T. Belytschko. A finite element method for crack growth without remeshing. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 46 :131–150, 1999. 86

[107] J. J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 30 :543–574, 1992. 86

[108] G. Morales-Espejel. Semi-analytical methods for surface life analysis in elastohydrodynamically lubricated and dry contacts, 2009. 41, 44

[109] J.-J. Moreau. Unilateral Contact and Dry Friction in Finite Freedom Dynamics. In J.-J. Moreau and P.D. Panagiotopoulos, editors, *Nonsmooth Mechanics and Applications*, pages 1–82. 1988. 42

[110] Z. Mroz and R.H. Plaut. On the stability and post-critical behavior of elastic structures with dry friction. *Int. J. Solids Struct.*, 29(10) :1241–12(3, 1992. 41

[111] V.-D. Nguyen, C. Cogné, M. Guessasma, E. Bellenger, and J. Fortin. Discrete modeling of granular flow with thermal transfer : Application to the discharge of silos. *Appl. Therm. Eng.*, 29(8-9) :1846–1853, 2009. 62

[112] V.-H. Nhu. *Dialogues Numériques Entre Echelles Tribologiques*. PhD thesis, INSA-Lyon, 2013. 79, 88, 90, 97, 98

[113] H. Nolle and R.S.H. Richardson. Static friction coefficients structural joints for mechanical and. *Wear*, 28 :1–13, 1974. 42

[114] Z. Olesiak, Y. Pyryev, and A. Yevtushenko. Determination of temperature and wear during braking. *Wear*, 210(1-2) :120–126, 1997. 61, 64

[115] G. Ouenzerfi, F. Massi, E. Renault, and Y. Berthier. Squeaking friction phenomena in ceramic hip endoprothesis : modeling and experimental validation. *Mech. Syst. Signal Proc.*, to appear, 2014. 41

[116] G. Peillex. *Modélisations numériques multi-échelles du comportement dynamique de matériaux composites sous sollicitations tribologiques : cas des composites Carbone/Carbone utilisés en freinage aéronautique*. PhD thesis, INSA-Lyon, 2007. 90

[117] G. Peillex, L. Baillet, and Y. Berthier. Dynamic behavior of a homogenized composite under contact with friction loading. *C. R. Mecanique*, 335(7) :394–400, 2007. 45

[118] F. Perales, S. Bourgeois, A. Chrysochoos, and Y. Monerie. Two field multibody method for periodic homogenization in fracture mechanics of nonlinear heterogeneous materials. *Eng. Fract. Mech.*, 75(11) :3378–3398, 2008. 86

[119] M. Prat. Pore network models for the study of transfers in the porous wick of loop heat pipes. *Heat Pipe Tech.*, 1(2) :129–149, 2010. 103

[120] T. F. J. Quinn. Oxidational wear. *Wear*, 18(5) :413–419, 1971. 55

[121] F. Radjai, M. Jean, J. J. Moreau, and S. Roux. Force Distributions in Dense Two-Dimensional Granular Systems. *Phys. Rev. Lett.*, 77(2) :274–277, 1996. 55

[122] N. M. U. Renevier, J. Hamphire, V. C. Fox, J. Witts, T. Allen, and D. G. Teer. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS 2-based coatings. *Surf. Coat. Tech.*, 142-144 :67–77, 2001. 51

[123] M. Renouf. Grease flow modelling : A discrete element approach. Technical report, SKF, 2008. 55

[124] M. Renouf and P. Alart. Conjugate gradient type algorithms for frictional multicontact problems : applications to granular materials. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 194(18-20) :2019–2041, 2004. 45

[125] M. Renouf and Y. Berthier. Numerical Modeling of Heat Production and Transmission. In F. Radjaï and F. Dubois, editors, *Discrete numerical modeling of granular materials*, page 448. Wiley, 2011. 56, 61, 63

[126] M. Renouf, H.-P. Cao, and V.-H. Nhu. About Non Homogeneous Third-Body Flow. In *IJTC 2011*, 2011. 76

[127] M. Renouf, H.-P. Cao, and V.-H. Nhu. Multiphysical modeling of third-body rheology. *Tribol. Int.*, 44(4) :417–425, 2011. 56

[128] M. Renouf and N. Fillot. Coupling electrical and mechanical effects in discrete element simulations. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 74(2) :238–254, 2008. 56

[129] M. Renouf, M. Francesco, A. Saulot, and N. Fillot. Dialogue Numérique Entre Echelles Tribologiques. Technical report, ANR, 2012. 78, 79, 97, 102

[130] M. Renouf, F. Massi, N. Fillot, and A. Saulot. Numerical tribology of a dry contact. *Tribol. Int.*, 44(7-8) :834–844, 2011. 43, 79

[131] M. Renouf, A. Saulot, and Y. Berthier. Third-body flow during a wheel-rail interaction. In C.A. Motasoares, J.A.C. Martins, H.C. Rodrigues, J.A.C. Ambrósio, C.A.B. Pina, C.M. Motasoares, E.B.R. Pereira, and J. Folgado, editors, *III European Conference on Computational Mechanic*. Springer Netherlands, 2006. 46

[132] D. Richard. *Thermique des contact avec troisième corps solide - Modélisation et compréhension des phénomènes de frottements et de diffusion de la chaleur par la méthode des éléments discrets*. PhD thesis, INSA Lyon, 2008. 52, 56, 61, 64, 65

[133] D. Richard, I. Iordanoff, M. Renouf, and Y. Berthier. Thermal Study of the Dry Sliding Contact With Third Body Presence. *ASME J. Tribol.*, 130(3) :031404, 2008. 56, 62

[134] J. Rivière, M. Renouf, and Y. Berthier. Simulation du comportement thermique d'un milieu continu équivalent par méthode des éléments discrets. In *CSMA 2013*, pages 1–8, Giens (Var), 2013. 65, 95, 96

[135] M. O. Robbins and E. D. Smith. Connecting molecular-scale and macroscopic tribology. *Langmuir*, 12 :4543–4547, 1996. 46

[136] P. G. Rognon, J.-N. Roux, M. Naaïm, and F. Chevoir. Dense flows of cohesive granular materials. *J. Fluid Mech.*, 596 :21–47, 2008. 52, 53, 75

[137] P. A. Romero, T. T. Järvi, N. Beckmann, M. Mrovec, and M. Moseler. Coarse Graining and Localized Plasticity between Sliding Nanocrystalline Metals. *Phys. Rev. Lett.*, 113(3) :036101, 2014. 46

[138] I. L. Ryhming. On Temperature and Heat Source Disctributions in Sliding Contact Problems. *Acta Mech.*, 32 :261–274, 1979. 61

[139] T. Sakamoto. Normal displacement and dynamic friction characteristics in a stick-slip process. *Tribol. Int.*, 20(1) :25–31, 1987. 42

[140] A. Saulot. *Analyse tribologique du contact roue-rail - Mod{é}lisations et exp{é}rimentations*. PhD thesis, INSA-Lyon, 2005. 44

[141] A. Saulot. *Frottement ou Frottements ?* PhD thesis, Université de Lyon, 2013. 42, 79

[142] A. Saulot and L. Baillet. Dynamic finite element simulations for understanding wheel-rail contact instability states occuring under sliding conditions. *ASME J. Tribol.*, 128 :761–770, 2006. 60

[143] B. Seve, I. Iordanoff, and Y. Berthier. A discrete solid third body model : Influence of the intergranular forces on the macroscopic behaviour. *Tribology S.*, 39 :361–368, 2001. 46

[144] S. Simon, A. Saulot, C. Dayot, X. Quost, and Y. Berthier. Tribological characterization of rail squat defects. *Wear*, 297(1-2) :926–942, 2013. 55

[145] W. W. M. Siu and S. H.-K. Lee. Transient Temperature Computation for a System of Multiply Contacting Spheres in a 180-Degree Orientation. *J. Heat Transf.*, 121 :739–742, 1999. 61

[146] N. Sukumar, B. Moran, and T. Belytschko. The natural element method in solid mechanics. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 43 :839–887, 1998. 86

[147] T. Telliskivi and U. Olofsson. Wheel-rail wear simulation. *Wear*, 257(11) :1145–1153, 2004. 60

[148] J. Tichy. Rheological Behavior of Confined Fluids in Thin Lubricated Contacts. *ASME J. Appl. Mech.*, 68(2) :278, 2001. 42

[149] D. Tonazzi, F. Massi, A. Culla, L. Baillet, A. Fregolent, and Y. Berthier. Instability scenarios between elastic media under frictional contact. *Mech. Syst. Signal Proc.*, 40(2) :754–766, 2013. 79

[150] H. Troadec, F. Radjai, S. Roux, and J. Charmet. Model for granular texture with steric exclusion. *Phys. Rev. E*, 66(4) :1–5, 2002. 55

[151] A. Uecker. Lead-free carbon brushes for automotive starters. *Wear*, 255(7-12) :1286–1290, 2003. 56

[152] K. Van Dang and M. H. Maitournam. On some recent trends in modelling of contact fatigue and wear in rail. *Wear*, 253(1-2) :219–227, 2002. 45

[153] W. L. Vargas and J. J. McCarthy. Heat conduction in granular materials. *AIChE Journal*, 47(5) :1052–1059, May 2001. 61

[154] W. L Vargas-escobar. *Discrete Modeling of Heat Conduction in Granular Media*. PhD thesis, University of Pittsburgh, 2002. 61

[155] L. Verlet. Computer "Experiments" on Classical Fluids. I. Thermodynamical Properties of Lennard-Jones Molecules*. *Phys. Rev.*, 159(1) :98–103, 1967. 52

[156] L. Verlet. Computer "Experiments" on Classical Fluids. II. Equilibrium Correlation Functions*. *Phys. Rev.*, 165(1) :201–214, 1967. 52

[157] V. Visseq. *Calcul haute performance en dynamique des contacts via deux familles de décomposition de domaine*. PhD thesis, Université Montpellier 2, 2013. 104

[158] N. Weinzapfel and F. Sadeghi. A Discrete Element Approach for Modeling Cage Flexibility in Ball Bearing Dynamics Simulations. *ASME J. Tribol.*, 131(2) :021102, 2009. 44

[159] J. A. Wensing. *On the Dynamics of Ball Bearings*. PhD thesis, University of Twente, 1998. 41, 44

[160] E. Y. A. Wornyoh, V. K. Jasti, and C. F. Higgs III. A review of dry particulate lubrication : powder and granular materials. *ASME J. Tribol.*, 129 :438–449, 2007. 51

[161] V. Yastrebov. *Computational contact mechanics : geometry , detection and numerical techniques*. PhD thesis, ENS Paris, 2012. 45

[162] M. Yousuff and N. W. Page. Particle material, morphology and load effects on internal friction in powders. *Powder Technol.*, 76 :155–164, 1993. 42

[163] W. Zhong and D. Tomanek. First-Principles Theory of Atomic-Scale Friction. *Phys. Rev. Lett.*, 64(25) :3054–3057, 1990. 42

[164] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor. *The Finite Element Method in Engineering Science*. Mc Graw-Hill, London, 2000. 45