



N° d'ordre NNT : 2018LYSEI112

**THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**  
opérée au sein de  
**l'institut national des sciences appliquées de Lyon**

**École Doctorale N° 162**  
**Mécanique, énergétique, génie civil et acoustique**

**Spécialité :**  
**Mécanique**

Soutenue publiquement le 17/12/2018, par :  
**Eric Chapeuil**

---

**Matériaux numériques tribologiques  
pour un système de freinage ferroviaire**

---

Devant le jury composé de :

DENAPE, Jean	Professeur (ENIT)	<b>Président</b>
RICHARD, Caroline ARTONI, Riccardo	Professeure (Univ. de Tours) CR HDR (IFSTARR Nantes)	<b>Rapporteuse</b> <b>Rapporteur</b>
BERTHIER, Yves RENOUF, Mathieu	DR CNRS (INSA de Lyon) CR HDR CNRS (Univ. de Montpellier)	<b>Directeur de thèse</b> <b>Co-directeur de thèse</b>



Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ÉCOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
<b>CHIMIE</b>	<b>CHIMIE DE LYON</b> <a href="http://www.edchimie-lyon.fr">http://www.edchimie-lyon.fr</a> Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage <a href="mailto:secretariat@edchimie-lyon.fr">secretariat@edchimie-lyon.fr</a> INSA : R. GOURDON	<b>M. Stéphane DANIELE</b> Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 Avenue Albert EINSTEIN 69 626 Villeurbanne CEDEX <a href="mailto:directeur@edchimie-lyon.fr">directeur@edchimie-lyon.fr</a>
<b>E.E.A.</b>	<b>ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</b> <a href="http://edeca.ec-lyon.fr">http://edeca.ec-lyon.fr</a> Sec. : M.C. HAVGODOUKIAN <a href="mailto:ecole-doctorale.eea@ec-lyon.fr">ecole-doctorale.eea@ec-lyon.fr</a>	<b>M. Gérard SCORLETTI</b> École Centrale de Lyon 36 Avenue Guy DE COLLONGUE 69 134 Écully Tél : 04.72.18.60.97 Fax 04.78.43.37.17 <a href="mailto:gerard.scorletti@ec-lyon.fr">gerard.scorletti@ec-lyon.fr</a>
<b>E2M2</b>	<b>ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION</b> <a href="http://e2m2.universite-lyon.fr">http://e2m2.universite-lyon.fr</a> Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : H. CHARLES <a href="mailto:secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr">secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr</a>	<b>M. Fabrice CORDEY</b> CNRS UMR 5276 Lab. de géologie de Lyon Université Claude Bernard Lyon 1 Bât. Géode 2 Rue Raphaël DUBOIS 69 622 Villeurbanne CEDEX Tél : 06.07.53.89.13 <a href="mailto:cordey@univ-lyon1.fr">cordey@univ-lyon1.fr</a>
<b>EDISS</b>	<b>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ</b> <a href="http://www.ediss-lyon.fr">http://www.ediss-lyon.fr</a> Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : M. LAGARDE <a href="mailto:secretariat.ediss@univ-lyon1.fr">secretariat.ediss@univ-lyon1.fr</a>	<b>Mme Emmanuelle CANET-SOULAS</b> INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 Avenue Jean CAPELLE INSA de Lyon 69 621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax : 04.72.68.49.16 <a href="mailto:emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr">emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr</a>
<b>INFOMATHS</b>	<b>INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES</b> <a href="http://edinfomaths.universite-lyon.fr">http://edinfomaths.universite-lyon.fr</a> Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 Fax : 04.72.43.16.87 <a href="mailto:infomaths@univ-lyon1.fr">infomaths@univ-lyon1.fr</a>	<b>M. Luca ZAMBONI</b> Bât. Braconnier 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.26.23.45.52 <a href="mailto:zamboni@maths.univ-lyon1.fr">zamboni@maths.univ-lyon1.fr</a>
<b>Matériaux</b>	<b>MATÉRIAUX DE LYON</b> <a href="http://ed34.universite-lyon.fr">http://ed34.universite-lyon.fr</a> Sec. : Marion COMBE Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.87.12 Bât. Direction <a href="mailto:ed.materiaux@insa-lyon.fr">ed.materiaux@insa-lyon.fr</a>	<b>M. Jean-Yves BUFFIÈRE</b> INSA de Lyon MATEIS - Bât. Saint-Exupéry 7 Avenue Jean CAPELLE 69 621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.85.28 <a href="mailto:jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr">jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr</a>
<b>MEGA</b>	<b>MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE</b> <a href="http://edmega.universite-lyon.fr">http://edmega.universite-lyon.fr</a> Sec. : Marion COMBE Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.87.12 Bât. Direction <a href="mailto:mega@insa-lyon.fr">mega@insa-lyon.fr</a>	<b>M. Philippe BOISSE</b> INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis Avenue Jean CAPELLE 69 621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.72.37 <a href="mailto:philippe.boisse@insa-lyon.fr">philippe.boisse@insa-lyon.fr</a>
<b>ScSo</b>	<b>ScSo*</b> <a href="http://ed483.univ-lyon2.fr">http://ed483.univ-lyon2.fr</a> Sec. : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS INSA : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04.78.69.72.76 <a href="mailto:viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr">viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr</a>	<b>M. Christian MONTES</b> Université Lyon 2 86 Rue Pasteur 69 365 Lyon CEDEX 07 <a href="mailto:christian.montes@univ-lyon2.fr">christian.montes@univ-lyon2.fr</a>

\*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie



*Le respect que nous souhaitons obtenir de l'homme envers ses semblables n'est qu'un cas particulier du respect qu'il faudrait ressentir pour toutes les formes de vie.*

Claude Lévi-Strauss



*A Anaïs*

*Pour son indéfectible soutien*



# Remerciements

Cette thèse a été effectuée au LaMCoS de l'INSA de Lyon en partenariat avec le LMGC de Montpellier et a été financée par Faiveley transport (Flertex). Après un long chemin de près de 4 ans, la thèse arrive à sa fin. C'est avec soulagement que j'écris ces lignes faisant suite à la soutenance. Dans cette partie, je souhaite remercier tous ceux qui m'ont aidé au cours de ces années.

Bien qu'étant non conventionnel, je tiens d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Anaïs qui m'a aidé à reprendre mes études et qui m'a soutenu tout au long des années. Sans elle, je n'aurais jamais pu arriver à ce niveau. Je la remercie de m'avoir empêché de baisser les bras et d'avoir supporté de nombreux week end de travail. Elle a cru en moi plus que moi-même depuis le début et m'a poussé à poursuivre dans la bonne voie, c'est pourquoi je lui dédie ce travail.

Je tiens également à remercier mes directeurs de thèse, Yves Berthier (du LaMCoS) et Mathieu Renouf (du LMGC). Yves m'a donné ma chance en thèse, malgré un profil quelque peu atypique, et m'a accordé une immense confiance en me permettant, entre autres, d'effectuer des conférences à sa place ou de préparer ses présentations. J'ai, de plus, beaucoup apprécié nos discussions passionnantes et quelques fois décalées. Mais n'est-ce pas en sortant des sentiers battus que l'on fait avancer la science? Quant à Mathieu, alors qu'au début de la thèse, je n'avais que peu de compétences en numérique, il m'a fait confiance et m'a permis d'acquérir et de développer de nouvelles compétences. Je le remercie pour son aide précieuse lors de la rédaction du manuscrit et de l'article. J'apprécie également, avec le recul, qu'il m'ait poussé à effectuer des conférences internationales qui ont été enrichissantes, bien que stressantes. Il est dommage, qu'avec la distance, nous n'ayons pu davantage partager.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail. Jean Denape, président du jury, m'a fourni une correction détaillée des erreurs du manuscrit. Les deux rapporteurs, Riccardo Artoni et Caroline Richard m'ont fourni un résumé clair illustrant ce mémoire et m'ont permis, grâce à un autre point de vu, et leur enthousiasme vis à vis de mes travaux, de prendre du recul et de me poser d'autres questions quant au travail effectué..

Je tiens à remercier également Ana-Maria Sfarghiu pour m'avoir accueilli dans son bureau la première moitié de la thèse et pour m'avoir également aidé a effectué des essais expérimentaux de qualification des garnitures (MEB, AFM, LIBS). Un grand merci à Sylvie Descartes pour son aide lors de la conférence Eurobrake. Je remercie, de plus, Itziar Serrano, pour m'avoir transmis ses données de tomographie qui m'ont permis de mener à bien ces travaux. Merci aussi à Jérôme Rivière et à Chaoqun Zeng pour leurs conseils avisés en début de thèse. Je souhaite exprimer ma gratitude à Emmanuel Montero pour toute son aide logistique. Enfin, j'adresse des remerciements à Faiveley transport ainsi qu'aux développeurs de LMGC90 qui ont rendu ce travail possible et une pensée amicale pour l'équipe TMI pour sa sympathie.

Mes pensées se tournent aussi vers "l'équipe des poilus" qui a été un soutien important de part leur présence tout au long des années ainsi que Kris et Timothy pour leur gentillesse ainsi que leur patience et vers les autres membres de ma famille qui m'ont soutenus.



# Résumé

L'augmentation de la vitesse ferroviaire impose l'amélioration des performances de freinage liés aux matériaux de friction utilisés dans les freins à disques et à semelles. Cependant, l'usure reste un point limitant en terme de performance mais aussi de sécurité. Elle a pour conséquence de détériorer les matériaux (aspects mécano-thermiques) mais aussi de contaminer le contact entre roue et rail par des particules de semelles de frein pouvant isoler électriquement celui-ci (aspects mécano-électriques). Le procédé permettant de localiser les trains, ayant pour principe la conduction électrique entre roue et rail, est alors compromis.

Ces problématiques sont gouvernées par les différents contacts (roue/rail, roue/semelle, ...) qui s'inscrivent dans le concept de triplet tribologique. Un triplet est composé des corps en contact (premiers corps), de l'interface (troisième corps) et du mécanisme qui les maintient en contact. Afin de comprendre les phénomènes se produisant au sein des contacts, une analyse multi-physique locale et un découplage des paramètres (mécaniques, thermiques, électriques) s'avèrent nécessaires. Toutefois, cela est difficile à établir expérimentalement, une modélisation numérique par éléments discrets est alors pertinente pour palier à ces besoins.

L'écoulement dynamique d'un troisième corps constitué de particules de freinage et la dégradation d'un matériau de freinage réel (suite à des méthodes d'imageries) sont modélisés. Les résultats obtenus ont permis d'appréhender les compétitions existant entre paramètres physiques d'une part (mécanique, électrique, thermique) et paramètres d'échelles d'autre part (local, global). Ces compétitions tendent à minimiser la résistance électrique lorsque les constituants sont en proportion adéquat (meilleure conduction électrique entre roue et rail) mais aussi à équilibrer les débits du circuit tribologique, ce qui conduit à protéger les matériaux (usure contrôlée). En outre, les analyses numériques ont permis de mettre en évidence de nouveaux paramètres liés à "l'étalement" du troisième corps et d'appréhender les points clés permettant de se rapprocher d'un contact réel.

Mots clés : méthode des éléments discrets, tribologie, triplet tribologique, circuit tribologique, mixture, shuntage, usure, multi-physique, freinage ferroviaire, traitement d'images.



# Summary

The increase of the rail speed imposes the improvement of the braking performances related to the friction materials used in brake pad and brakes shoes. However, wear remains a limiting point in terms of performance but also safety. It has the effect of damaging the materials (mechano-thermal aspects) but also to contaminate the contact between wheel and rail by particles of brake shoes that can electrically isolate it (mechanical-electrical aspects). The method for locating the trains, whose principle is the electrical conduction between wheel and rail, is then compromised.

These issues are governed by the different contacts (wheel/rail, wheel/shoes, ...) that fit into the concept of tribological triplets. These are composed of the bodies in contact (first bodies), the interface (third body) and the mechanism that keeps them in contact. In order to understand the phenomena occurring within the contacts, a local multi-physics analysis and a decoupling of the parameters (mechanical, thermal, electrical) are necessary. However, this is difficult to establish experimentally, numerical modeling by discrete elements method is then relevant for these needs.

The dynamic flow of a third body consisting of braking particles and the degradation of a real braking material (following imaging methods) are modeled. The results obtained made it possible to understand the competitions existing between physical parameters on the one hand (mechanical, electrical, thermal) and scale parameters on the other hand (local, global). These competitions tend to minimize the electrical resistance when the constituents are in adequate proportion (better electrical conduction between wheel and rail) but also to balance the flows of the tribological track, which leads to protect the materials (controlled wear). In addition, the numerical analyzes made it possible to highlight new parameters related to "spreading" of the third body and to apprehend the key points making it possible to approach a real contact.

Keywords : discrete element method, tribology, tribological triplet, tribological track, mixture, shunting, wear, multi-physical, rail braking, picture processing.



# Sommaire

<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>Chapitre 1 État de l’art</b>	<b>9</b>
I    Le freinage ferroviaire : un rapide historique . . . . .	9
I.1    Généralités sur le freinage ferroviaire . . . . .	9
I.2    L’évolution des freins mécaniques . . . . .	10
I.3    Freinage mécanique actuel . . . . .	12
II   Performances et sécurité . . . . .	13
II.1   Dégradation . . . . .	13
II.2   Conséquence environnementale de l’usure . . . . .	14
II.3   Localisation des trains . . . . .	15
III  Notions physiques pour décrire ... . . . .	16
III.1  ... la déformation au contact . . . . .	16
III.2  ... l’usure des matériaux . . . . .	18
IV  Outils d’analyses tribologiques . . . . .	22
IV.1  Méthodes expérimentales . . . . .	23
IV.2  Méthodes numériques . . . . .	25
<b>Chapitre 2 Cadre numérique</b>	<b>29</b>
I    Introduction . . . . .	29
II   Aspects mécaniques . . . . .	30
II.1   De l’approche globale vers l’approche locale . . . . .	30
II.2   Lois d’interaction . . . . .	32
III  Aspects thermiques . . . . .	35
III.1  Approche globale . . . . .	35
III.2  Approche locale . . . . .	36
IV  Aspects électriques . . . . .	37
IV.1  Approche électrique globale . . . . .	37
IV.2  Conductance locale . . . . .	38
V    Outil numérique . . . . .	40
VI   Conclusion . . . . .	40

<b>Chapitre 3</b>	<b>Impact de la composition du troisième corps dans les phénomènes mécano-électriques de l'interface</b>	<b>43</b>
I	Introduction . . . . .	43
I.1	Philosophie générale . . . . .	43
I.2	Echantillon numérique . . . . .	44
I.3	Mesures globales . . . . .	45
I.4	Analyse adimensionnée . . . . .	46
II	Troisième corps homogène . . . . .	47
II.1	Mesures mécaniques . . . . .	48
II.2	Mesures électriques . . . . .	49
II.3	Énergie de cohésion . . . . .	51
III	Troisième corps hétérogène . . . . .	52
III.1	Complexification de l'interface . . . . .	52
III.2	Impact du frottement local . . . . .	53
III.3	Impact de la cohésion locale . . . . .	56
III.4	Frottement local VS cohésion locale . . . . .	58
III.5	Influence sur la microstructure . . . . .	60
III.6	Discussion sur le comportement mécano-électrique d'un troisième corps cuivre/graphite . . . . .	61
IV	Synthèse sur l'influence des matériaux de freinage au sein du troisième corps	63
<b>Chapitre 4</b>	<b>Analyse de la dégradation de matériaux de freinage</b>	<b>67</b>
I	Introduction . . . . .	67
I.1	Philosophie générale . . . . .	67
I.2	Endommagements local et global . . . . .	70
II	Échantillon homogène . . . . .	70
II.1	Impacts des sollicitations globales . . . . .	71
II.2	Vers un troisième corps cohésif . . . . .	75
II.3	Un premier bilan . . . . .	78
III	Échantillon bi-phasique . . . . .	78
III.1	Relation composition/frottement . . . . .	79
III.2	Relation composition/endommagement . . . . .	80
III.3	Influence des propriétés inter-phase . . . . .	82
III.4	Un second bilan . . . . .	86
IV	Du matériau réel au matériau numérique . . . . .	86
IV.1	Garniture G36S . . . . .	86
IV.2	Choix du volume élémentaire . . . . .	91
IV.3	Dégradation du matériau de freinage . . . . .	94
IV.4	Un troisième bilan . . . . .	105
V	Discussion sur la dégradation des matériaux de freinage . . . . .	106

---

<b>Chapitre 5 Modèle d'usure pour les matériaux de freinage</b>	<b>109</b>
I Introduction de l'usure dans le modèle discret . . . . .	109
II Construction d'un modèle d'usure . . . . .	110
II.1 Conditions choisies pour la modélisation de l'usure . . . . .	110
II.2 Méthodologie . . . . .	112
III Différents types d'usure ... . . . .	113
III.1 ... et leurs impacts sur les débits de matière . . . . .	113
III.2 ... et leur dépendance aux différentes sollicitations . . . . .	115
III.3 ... et leur comportement mécano-thermique . . . . .	119
IV Rôle des constituants pour les différents types d'usure . . . . .	121
IV.1 Cas de l'usure instantanée . . . . .	122
IV.2 Cas de l'usure évolutive . . . . .	125
V Discussion sur le modèle d'usure . . . . .	127
<b>Conclusion</b>	<b>131</b>
<b>Perspectives</b>	<b>135</b>
<b>Annexes</b>	<b>145</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>163</b>
<b>Abréviations</b>	<b>173</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>178</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>179</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>187</b>



# Introduction

L'évolution de la vitesse des trains est toujours en plein essor. Des projets de recherche ont pour objectif d'augmenter la vitesse des TGV de 320 km/h actuellement à 360 km/h dans un proche futur. Cette augmentation de vitesse nécessite des freins plus performants.

Il existe divers systèmes pour freiner les trains mais ce sont les freins dits "mécaniques" qui seront abordés dans ce mémoire, c'est à dire les freins à semelles et les freins à disques. Les semelles de frein viennent s'appliquer directement sur la bande de roulement d'une roue. Quant aux disques de frein (positionnés sur les essieux), ils sont stoppés par des garnitures de freinage situées de part et d'autre de ceux-ci. Lors du freinage, le frottement génère de la chaleur, induisant une hausse de la température des disques ou des matériaux de freinage (semelles, garnitures), pouvant provoquer sur du long terme une altération de leurs propriétés et de leur intégrité vis à vis de leur rôle premier. Le frottement dû au freinage provoque également l'usure des matériaux, qui peut avoir de graves conséquences vis à vis de la sécurité ferroviaire mais également pour les performances de vitesses envisagées. Pour le freinage classique d'un train grande vitesse (TGV) roulant à 300 km/h, la distance d'arrêt s'élève à environ 3500 m pour un temps de freinage de près de 80 secondes. De ce fait, l'usure produite sur les freins de TGVs peut être catastrophique au vu de la vitesse des convois et de la masse à freiner [COPI 00].

Au delà de la perte de fonction sécuritaire du freinage due à l'usure elle-même, l'usure des semelles de frein peut induire des problèmes de localisation (shuntage) lorsque des particules d'usure sont piégées dans le contact entre roue et rail isolant électriquement ce dernier. De graves accidents peuvent alors survenir si le système de localisation est associé à une barrière de sécurité.

Enfin la dernière conséquence principale de l'usure est environnementale. En effet, lors des frottements entre roue et semelles ou entre disque et garniture, les particules qui se détachent des corps en contact peuvent se retrouver dans l'air environnant. En fonction de la taille des particules, les conséquences sur l'organisme peuvent être dramatiques. De ce fait les fabricants sont extrêmement sensibles à ces conséquences, les poussant à proposer l'usage de nouveaux matériaux de freinage pour garantir un meilleur contrôle de l'usure afin de diminuer cette production de particules.

L'optimisation des matériaux de freinage peut se faire par de nombreuses approches. La plus utilisée reste l'approche essais/erreurs qui peut s'avérer la plus efficace (au sens de rapide) mais également la plus coûteuse et a le grand défaut de ne pas s'attarder à la compréhension des phénomènes sous jacents. Une solution pouvant paraître moins efficace en terme de rapidité mais qui permet de comprendre la complexité du problème est de procéder à une analyse de systèmes modèles afin d'affirmer ou d'infirmer les hypothèses soulevées. Cette analyse peut alors se faire au travers d'une approche expérimentale ou numérique, ou, dans le meilleur des cas, avec un couplage des deux. Cependant, afin d'analyser les problématiques liées au freinage ferroviaire telle que l'usure, il est nécessaire d'analyser les contacts en jeu. Les contacts étant confinés, il reste très difficile de les analyser expérimentalement (même si cela reste de moins en moins vrai).

De ce fait, pour compléter les approches expérimentales déjà existantes, l'utilisation d'une approche numérique semble plus avantageuse. Cependant de part la nature du problème, l'utilisation d'outils classiques comme les approches par éléments finis reste délicate car les sollicitations tribologiques imposent des hypothèses que les modèles continus ne peuvent pas satisfaire. C'est pourquoi les approches par éléments discrets semblent le plus amène pour modéliser ce type de contacts. L'utilisation d'une telle méthode va permettre de découpler les différents phénomènes et de pouvoir effectuer une analyse in-situ du contact. Toutefois, cette approche doit être multi-physique (mécanique, thermique, électrique), multi-échelle et, si possible, s'appuyer sur des travaux expérimentaux ayant pu être menés dans la littérature sur des matériaux similaires à ceux utilisés dans ce mémoire.

L'objectif de ce travail de thèse est de comprendre les mécanismes locaux jouant sur l'usure des matériaux de freinage ferroviaire. Pour cela, ce mémoire est organisé autour de 5 chapitres.

Le chapitre 1 est consacré à une présentation de l'état de l'art de la problématique. Le freinage ferroviaire et ses problématiques ainsi que les mécanismes d'usure sont présentés et le contexte tribologique conduisant à la modélisation numérique choisie est abordé.

Le chapitre 2 présente un peu plus en détail la méthode numérique qui a permis de mener à bien ces travaux. Les aspects multi-physiques abordés au cours de travaux précédents ainsi que les protocoles permettant d'élaborer les modèles numériques utilisés au cours des chapitres suivants sont présentés.

Le chapitre 3 traite de la problématique du shuntage avec pour but la mise en évidence du rôle de la composition de l'interface dans la propagation de l'électricité entre roue et rail. Le modèle numérique proposé est un modèle simplifié du contact roue rail basé sur un algorithme mécano-électrique. Les paramètres globaux tels que la résistance électrique et le frottement global sont analysés en fonction des paramètres locaux tels que frottement local et cohésion locale suivant la constitution de l'interface.

Le chapitre 4 s'intéresse à la dégradation des matériaux de freinage. La construction de volumes élémentaires (VE) est menée numériquement avec un algorithme mécano-thermique. L'analyse d'un modèle homogène est suivi de l'analyse d'un modèle constitué de deux matériaux et, enfin, de celle d'un modèle basé sur une garniture réelle. Pour cette dernière, des traitements d'images sont utilisés afin que chaque constituant de la garniture réelle soit représenté fidèlement dans le modèle. La dégradation globale, la température et le frottement sont analysés en fonction de la pression appliquée et du cisaillement. De plus, une analyse locale des constituants est menée.

Enfin, le chapitre 5 introduit des phénomènes d'usure. Des conditions d'usure sont définies pour permettre l'éjection définitive de certaines particules du contact. Ceci permet de reconstituer, tribologiquement parlant, la vie d'un contact. Ce chapitre met en évidence l'équilibre du circuit tribologique vis-à-vis d'un volume de matière stable au sein du contact et permettant de protéger le matériau de freinage d'une dégradation trop importante.



# Chapitre 1

## État de l’art

### I Le freinage ferroviaire : un rapide historique

#### I.1 Généralités sur le freinage ferroviaire

La notion de freinage “ferroviaire” naît au XVIème siècle dans les mines afin de freiner des wagonnets utilisés pour extraire le minerai. Les premiers freins utilisés sont des pièces de bois qui viennent s’appliquer sur la périphérie de la roue afin de la stopper. Ce n’est qu’au début du XIXème siècle en France qu’apparaît réellement le chemin de fer et que les différents modes de freinage se développent. Les premiers trains sont alors équipés de sabots de freins venant s’appliquer sur la bande de roulement de la roue (cf. fig. 1.1).

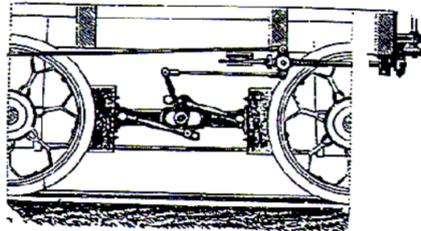


FIGURE 1.1 – Premier système de freinage [RAIL 15].

Seules les voitures les plus lourdes en sont équipées et des agents, appelés “gardes freins”, sont en charge du freinage d’une ou de plusieurs voitures. Toutefois, suite à des accidents mortels, les ingénieurs viennent à penser qu’il devient nécessaire d’avoir un frein continu et centralisé depuis la locomotive. Ce questionnement donne naissance quelques années plus tard au frein électrique. En cas de rupture du convoi, celui-ci s’actionne automatiquement et les sabots freinent les roues des voitures détachées. Cependant, ce type de freinage manque de fiabilité au niveau des connexions électriques entre véhicules [RAIL 15]. Il est alors abandonné au profit du frein pneumatique Westinghouse, inventé en 1872 et toujours utilisé actuellement (cf. fig. 1.2).

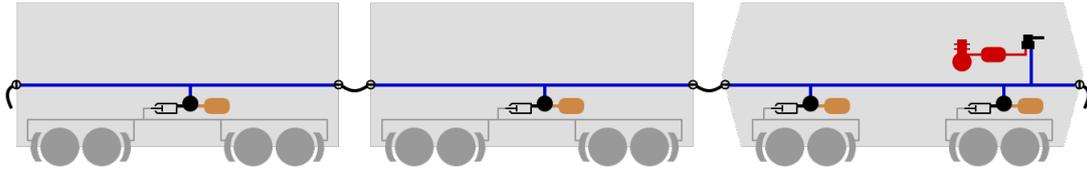


FIGURE 1.2 – Principe du freinage Westinghouse [ENCY 17].

Le système de freinage Westinghouse est continu (les freins peuvent être actionnés en tout point du train), automatique (si la conduite qui parcourt le train se rompt en un point quelconque, le freinage est enclenché automatiquement) et inépuisable (lorsque le frein est utilisé de manière répétée, il garde toujours les mêmes performances de freinage). Le principe en est le suivant. Une conduite de frein automatisée (CFA) se situe sur l'ensemble du train. Chaque voiture est équipée d'un robinet d'arrêt qui reste ouvert afin d'assurer la continuité entre les voitures. Il est fermé au niveau de la dernière voiture pour stopper le "circuit". Les compresseurs d'air emmagasinent l'air extérieur et le comprime dans un ou plusieurs réservoirs. Le conducteur peut ainsi faire varier la pression pour serrer ou desserrer les freins. Si la pression diminue, le serrage des freins s'effectue, et si elle augmente, les freins se desserrent. Ainsi, en cas de problème dans le système de freinage, les freins freinent automatiquement [SNCB 15].

## I.2 L'évolution des freins mécaniques

Le frein à sabot (que l'on appellera plus tard semelle) [TUDO 03] est le premier système de freinage mécanique à apparaître (cf. fig. 1.3). Il s'agit de l'idée élémentaire consistant à appliquer le sabot directement sur la bande de roulement. Après celles en bois, différents types de semelles se succèdent.



FIGURE 1.3 – Freins à semelles [ENCY 17].

De part leur facilité de conception, leur faible coût et leur insensibilité à l'humidité (caractéristique primordiale pour des systèmes soumis à la pluie ou au givre entre autres) [RAIL 15], les semelles en fonte sont les premières à être fabriquées pour freiner les roues en acier. Cependant, elles présentent une usure assez élevée et leurs caractéristiques de

frottement ne sont pas entièrement satisfaisantes. Leur facteur de frottement est assez bas (de l'ordre de 0,1), variant en fonction de la vitesse et de la pression d'application [DESC 15]. Cela induit un manque de confort auprès des passagers pouvant s'avérer dangereux pour leur sécurité. Ces semelles produisent également un bruit désagréable [CLEO 10] lors du freinage mais également hors phase de freinage dû à la détérioration des roues par le frottement des semelles sur la bande de roulement. Des améliorations sont proposées avec l'ajout de phosphore permettant de diminuer l'usure de la semelle lors du freinage mais ceci les rend plus fragiles, limitant la quantité de phosphore utilisée [BRUN 07].

Dans les années 1960, en parallèle des semelles de frein, apparaît le frein à disques. L'objectif est d'avoir un système de freinage permettant de dissiper davantage d'énergie. Des disques sont positionnés sur les essieux (solidaires de ceux-ci) et des garnitures de frein (initialement en matériaux composites [LOYE 12]) se situant de part et d'autre du disque viennent s'appliquer sur celui-ci lors du freinage.

Comme pour les semelles, les premiers disques sont en fonte (simple à réaliser pour un faible coût avec de bonnes propriétés thermiques). D'autres matériaux sont ensuite utilisés augmentant encore les performances de freinage et permettant alors aux convois de gagner en vitesse. Parmi eux, des disques en acier, qui, à poids équivalents avec les disques en fonte, permettent de dissiper 2,5 fois plus d'énergie. Toutefois, les semelles de freins ne sont pas complètement abandonnées car elles restent nécessaires au nettoyage des roues et permettent de solliciter plus d'adhérence au niveau du contact roue-rail.

C'est au milieu des années 1960, qu'apparaissent les semelles en matériau composite. Celles-ci permettent de réduire le bruit, propose un rapport de frottement plus grand et une meilleure résistance à l'usure. Deux types de semelles sont utilisées : la semelle K dite à haut rapport de frottement (0,25 environ) et la semelle L dite à faible rapport de frottement (0,17 environ). Cependant, elles présentent toutes les deux une forte sensibilité à l'humidité pouvant faire chuter énormément le rapport de frottement, augmentant ainsi considérablement les distances d'arrêt. Si ce défaut a été corrigé, elles présentent d'autres inconvénients majeurs. En particulier, elles sont sujettes aux inclusions métalliques (plus agressives vis-à-vis de la roue) et elles polissent la table de roulement (sollicitent moins l'adhérence). Il devient donc nécessaire de concevoir des semelles peu sensibles à l'humidité et capables d'absorber de fortes énergies.

C'est dans cet objectif que sont apparues les semelles en matériau fritté, possédant à la fois les qualités des semelles en fonte et des semelles en matériau composite :

- un haut rapport de frottement (0,25 en moyenne),
- une faible sensibilité à l'humidité et à la vitesse,
- un dépolissage de la table de roulement de la roue (favorable en termes d'adhérence).

Cependant, leur coût de fabrication reste très élevé et elles ont le même défaut que celles en fonte en terme de bruit et d'agression de roue. Elles sont à leur tour abandonnées au

profit de nouvelles semelles en matériaux composites et frittés, moins onéreuses et plus silencieuses [RAIL 15].

Depuis maintenant quelques années, ce sont des semelles à faible niveau de frottement (LL) qui sont testées [DECI 15]. Ces semelles n'endommagent pas les surfaces de roulement et réduisent le bruit de roulement de 10 décibels, soit la moitié du bruit perçu par l'oreille humaine [UIC 11]. Elles ont une bonne stabilité de frottement, une faible usure, sont peu sensibles à la chaleur et sont économiquement plus avantageuses que les semelles K et L [DESC 15].

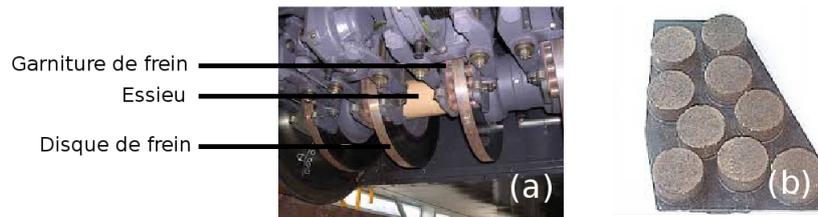


FIGURE 1.4 – Système de frein à disques (a) et garnitures de freinage (b) [RAIL 15].

En ce qui concerne les freins à disques, les capacités thermiques limitées des garnitures de freinage en matériaux composites ont conduit les fabricants à les remplacer par des matériaux frittés (cf. fig. 1.4) [DESC 15] [BRUN 07] [FR3 02].

### I.3 Freinage mécanique actuel

#### (a) Contacts disque-garniture

Le système de freinage par disques est toujours beaucoup utilisé. Un ou plusieurs disques de frein sont montés sur les essieux. Des blocs de freinage sont présents derrière les disques. Lorsque ces blocs sont sollicités pour le freinage, les garnitures (appelées aussi patins) sont appliquées sur les disques afin de freiner les convois (cf. fig. 1.5).

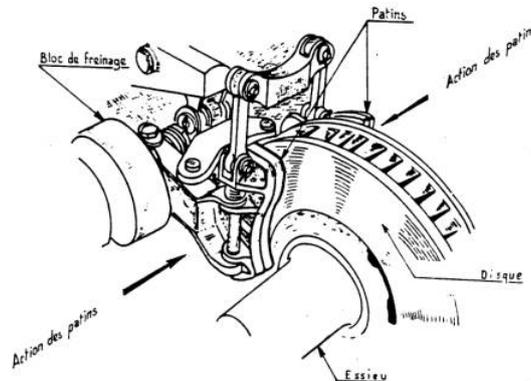


FIGURE 1.5 – Schéma du système disque-garniture [DESC 15].

## (b) Contacts roue-semelle

Le freinage par semelle s'est beaucoup développé jusqu'à nos jours et son utilisation est toujours d'actualité. La semelle de frein permet de freiner les essieux par frottement sur la table de roulement des roues (cf. fig. 1.6). Les semelles diffèrent par leur forme, leur composition ou leur nombre (suivant les efforts de freinage recherchés). La semelle de frein s'adapte sur un support appelé porte-semelle (ou patin de freinage). Un levier permet l'application de la semelle sur la roue lorsque le freinage est enclenché [DESC 15].

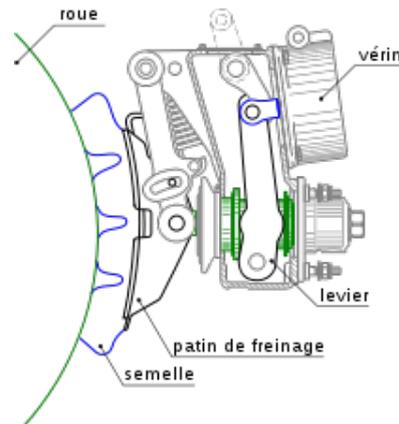


FIGURE 1.6 – Schéma du système roue-semelle [DESC 15].

## II Performances et sécurité

### II.1 Dégradation

Au cours du temps, les freins mécaniques ont été continuellement améliorés suivant trois aspects principaux :

- les performances (augmentation de la vitesse, freinage plus puissant),
- la sécurité (rôle des constituants des matériaux de freinage dans la localisation des trains pour éviter les problèmes de collision, freinage assez performant pour que le convoi s'arrête convenablement),
- les coûts (augmentation du rendement, augmentation de la durée de vie des matériaux de freinage, diminution du nombre d'accidents pour limiter les coûts de remplacement).

Ainsi, afin de permettre aux convois ferroviaires d'être plus performants en termes de vitesse, d'améliorer la sécurité lors du freinage et de diminuer les coûts, il est nécessaire de comprendre et de contrôler l'usure des matériaux de freinage (semelles et garnitures) qui vient impacter les trois aspects principaux cités précédemment.

En effet, lors du freinage des trains, les semelles et garnitures sont soumises à de nombreuses sollicitations pouvant conduire à leur dégradation. Celle-ci est alors définie comme étant une détérioration de la surface des matériaux pouvant engendrer un détachement de particules. Elle est provoquée par l'action mécanique du frottement contre la roue ou le disque, l'effet thermique qui en résulte ou encore les réactions physico-chimiques se produisant par interaction avec l'environnement.

Lorsque la matière détachée des matériaux de freinage est évacuée hors du contact, on parlera alors d'usure. Celle-ci est en effet définie comme étant "une perte progressive de matière, à la surface active d'un corps, par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface. Cela s'applique à tout événement provoquant une perte de fonction des composants du système" [CART 01] (cf. fig. 1.7).

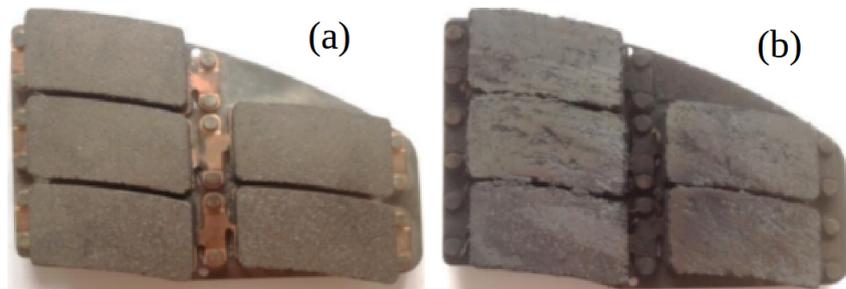


FIGURE 1.7 – Garniture de freinage (a) neuve (b) usée [COPI 00].

Les matériaux de freinage ne peuvent alors plus assurer leurs fonctions sécuritaires de manière pérenne. Une attention particulière est à porter sur les sollicitations dues au disque et à la roue qui ne doivent pas provoquer l'endommagement des matériaux de freinage et une usure trop élevée. Mais, paradoxalement, l'endommagement des matériaux permet de protéger les matériaux des fissurations [ARNA 17]. Ainsi, un endommagement minimal est utile pour protéger et nettoyer le matériau. C'est pourquoi il faut trouver un compromis entre les performances recherchées et l'usure qui est inévitable mais doit tout de même être très réduite [COPI 00] [BULT 06].

## II.2 Conséquence environnementale de l'usure

L'une des principales conséquences de l'usure est environnementale. En effet, lors des frottements entre roue et semelle ou entre disque et garniture, les particules qui se détachent des corps en contact peuvent se retrouver dans l'air environnant. Elles sont classées en trois catégories :

- des grosses particules de 2 à 10 micromètres de diamètre ;
- des particules fines de 0,1 à 2 micromètres de diamètre ;
- des particules ultra-fines inférieures 0,1 micromètre de diamètre.

Les grosses particules sont issues de processus mécaniques tel que le frottement et ont des mouvements dépendant de leur poids [FORT 08]. Dans la réglementation des notations, les particules dont le diamètre est inférieur à  $x$  micromètres sont notées  $PM_x$ . Ceci a pour but de définir les catégories de particules pouvant pénétrer dans le système respiratoire. La majorité des particules de moins de 10 micromètres le peuvent, mais uniquement les plus petites particules peuvent atteindre le système alvéolaire des poumons sans être bloquées [FORT 08].

Les particules de type  $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$  sont émis par les moteurs, l'usure des roues, des rails, des caténaires et des freins. Mais les poussières issues de ces usures sont principalement des  $PM_{10}$ . Selon la norme, 50% des particules  $PM_{10}$  contient des particules de 10 micromètres. D'après une étude réalisée sur un réseau présent en Lorraine, le freinage est la plus importante source de  $PM_{10}$  avec 60% de la totalité de ces particules émises (source : 2004) [RODL 12] [OBSE 15].

Les fabricants des matériaux de freinage veulent également diminuer cette pollution environnementale en utilisant des matériaux plus respectueux de l'environnement. L'usage de nouveaux matériaux de freinage ainsi qu'un meilleur contrôle de l'usure a pour but de diminuer cette production de particules.

### II.3 Localisation des trains

L'une des autres conséquences principales liée à l'usure est le problème de shuntage lié à la localisation des trains sur le réseau ferroviaire. Afin d'assurer une sécurité optimale, celui-ci est divisé en zone appelée *cantons*, permettant d'assurer un espacement minimal entre les véhicules. Dans ces cantons, des circuits de voie (CDV) ont été mis en place pour détecter la présence d'un train (cf. fig. 1.8).

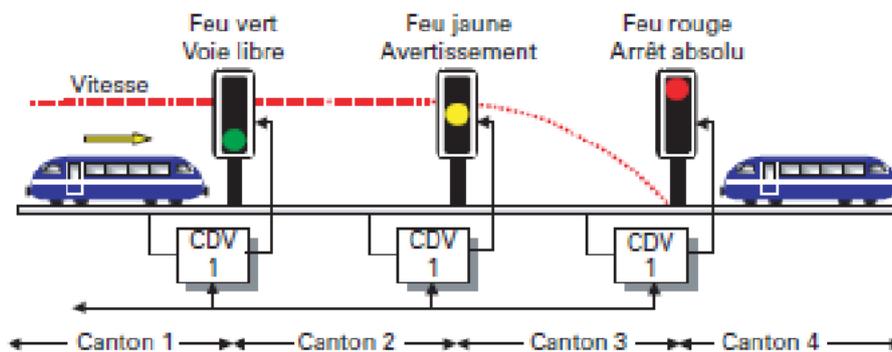


FIGURE 1.8 – Fonctionnement des circuits de voies [CHAP 07].

Les deux files de rails constituent une ligne de transport d'électricité entre un générateur et un récepteur (situés de part et d'autre du canton). Un faible courant circule dans les

rails. Les files sont isolées l'une de l'autre par les traverses. Lorsqu'un véhicule traverse un de ces cantons (du récepteur vers l'émetteur), une partie de l'électricité est déviée par les essieux, provoquant un shuntage (ou court-circuit). Il demeure alors une tension résiduelle dans les rails qui ne doit pas dépasser une valeur limite pour la fiabilité du shuntage [RFF 11]. Pour cela, il est donc nécessaire que le contact entre roue et rail soit le plus conducteur possible [BERT 04,DEMA 06,CHAP 07,DESC 08].

Toutefois, divers polluants peuvent être présents entre la roue et le rail (des feuilles mortes, de l'huile, des pierres de ballast, des particules de roue, de rail ou encore de semelles de frein) altérant alors les propriétés de l'interface roue-rail [DESC 05]. Chaque polluant ou mélange va donc avoir un rôle différent. Toutefois, parmi ces différents éléments, les particules issues de l'usure des semelles de frein présentent un intérêt majeur. En effet, au début des années 2000, la Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF) a lancé une campagne dont le but était de remplacer les semelles de frein en fonte encore en service par des semelles en matériaux composites. Il s'est alors produit une recrudescence de déshuntage<sup>1</sup> sur le réseau. De ce fait, les fabricants de matériaux de freinage ferroviaire ont lancé des études afin de comprendre les raisons pour lesquels le shuntage est plus efficace avec certains types de semelles qu'avec d'autres [INRE 06,DECI 15].

### III Notions physiques pour décrire ...

L'usure des matériaux de freinage doit être mieux comprise et mieux contrôlée afin d'assurer un bon freinage ainsi qu'une sécurité optimale. L'usure de ces matériaux est liée à des effets mécaniques (pression, cisaillement entre les deux corps en contact, ...) mais aussi thermiques (chaleur générée lors du frottement et se propageant entre les deux corps en contact, ...). Les conséquences de l'usure occasionnant des problèmes de shuntage, conduisent à prendre en compte également les effets électriques afin de pouvoir décrire la résistivité de l'interface. Les aspects mécano-thermiques et mécano-électriques sont présentés ici, permettant de comprendre davantage les phénomènes rencontrés.

#### III.1 ... la déformation au contact

##### (a) Généralités

Si elle paraît triviale, la déformation d'un contact reste un domaine d'intérêt et d'actualité. Depuis le modèle de Hertz [HERT 95], de nombreuses variantes ont vu le jour pour étendre les hypothèses initiales, contact élastique parfait en petite déformation, à la prise en compte de la plasticité, des rugosités, etc. De nombreux modèles analytiques ont alors été développés [BOWD 86] et aujourd'hui, ces derniers sont re-visités grâce à

---

1. Le dé-shuntage correspond à une non occupation ou à une libération intempestive d'une zone de circuit de voie, malgré la présence d'au moins un essieu dans la zone [RFF 11].

la puissance des outils numériques [BUCC 09, HOLM 81] ou encore au développement de l'impression 3D [NATI 18].

Ces notions sont extrêmement importantes dans un contexte multi-physique car l'aire de contact va piloter sa résistance aussi bien pour des aspects thermiques qu'électriques.

Lors des déformations élastiques, la déformation est faible et réversible. Les matériaux sont supposés élastiques, homogènes et isotropes, les forces de contact sont purement normales (forces tangentielles négligeables), le rayon de l'aire de contact est faible devant les rayons de courbure des deux solides.

Ainsi, le rayon de l'aire de contact circulaire est donnée par :

$$a = (3R^*/4E^*)^{1/3} F_n^{1/3} \quad (1.1)$$

où,  $E^*$ , désigne le module d'Young équivalent des matériaux en contact,  $R^*$ , le rayon de courbure équivalent des sphères en contact et  $F_n$ , la force normale appliquée sur les corps. A partir de cette valeur du rayon de l'aire de contact, il devient alors possible de déterminer aussi bien les échanges thermiques que électriques entre corps en contact.

## (b) Contact électrique

Concernant les aspects électriques, Certains concepts énoncent que le passage du courant électrique, à l'échelle des contacts, s'effectue par des zones restreintes, la résistance électrique est alors nommée "résistance de constriction". Holm fut l'un des premiers à mettre en évidence cette résistance de constriction [HOLM 81]. Beaucoup de modèles sont dérivés de ses travaux. Entre autre, il proposa de simplifier le problème en considérant une section circulaire de rayon  $a$  qui relie deux demi-espaces remplis de matière de résistivité électrique  $\rho_e$ . Les lignes de courant vont se rétrécir avant le passage entre les deux demi-espaces puis s'élargir après le passage. Il fit la distinction entre le cas d'un modèle parfait, sans film isolant à la surface des contacts et le modèle plus réaliste avec présence d'un film isolant.

Dans le cas général, la résistance de constriction, valable pour une constriction circulaire, est [HOLM 81] :

$$R_c = \frac{\rho_e}{2a} \quad (1.2)$$

$R_c$  étant la résistance de constriction et  $a$  le rayon du cercle de constriction.

Le modèle établi précédemment est donné pour un cas parfait, sans présence de film d'oxyde. Cependant, dans la réalité, un film d'oxyde est souvent présent à la surface des contacts, le comportement électrique du contact est alors celui de la couche d'oxyde présente à sa surface. La résistance de constriction de Holm s'écrit alors [HOLM 81] :

$$R_c = \frac{\rho_e e}{s} = \frac{\rho_e e}{\pi a^2} \quad (1.3)$$

où  $e$  est l'épaisseur de la couche d'oxyde,  $s$ , la section de constriction et  $a$  son rayon.

Afin de prendre en compte la déformation plastique de l'aire de contact, Holm a établi un modèle dans lequel le rayon de l'aire de contact est donné par :

$$a_P = \frac{F_n}{\pi P(F_n)} \quad (1.4)$$

$P(F_n)$  est la pression moyenne de contact qui dépend de la force normale appliquée  $F_n$ , des propriétés des matériaux, de la rugosité des surfaces et du modèle de plasticité utilisé [HOLM 81] [BELA 09].

Si le lecteur est intéressé par un point de vue plus mathématique entre la résistance de constriction et l'aire réelle de contact, il peut être utile de se référer entre autres aux travaux de Greenwood [GREE 86].

## III.2 ... l'usure des matériaux

### (a) Modèle d'Archard

Les premiers modèles d'usure remontent aux travaux de Rabinowitz [RABI 53] et d'Archard [ARCH 53] dans les années 50. Pour déterminer le volume de matière perdue et obtenir une loi d'usure, Archard développa un modèle de contact avec des aspérités sphériques de même taille sous déformations plastiques. Il se focalisa sur une aspérité plastifiée et supposa la perte de matière comme étant provoquée par adhésion de surface sous cisaillement (cf. fig. 1.9).

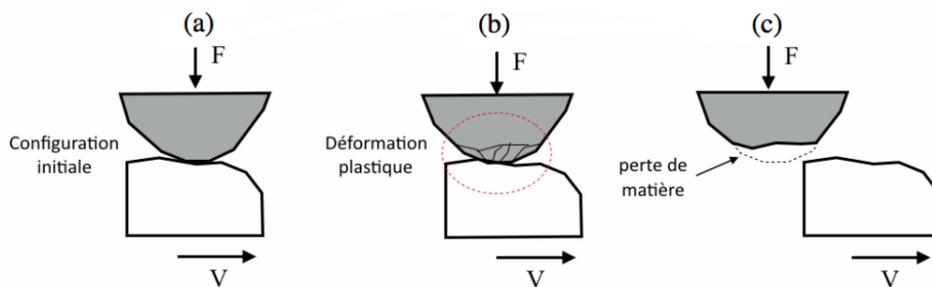


FIGURE 1.9 – Modèle d'Archard (sur ce schéma, seul le matériau du haut est susceptible de se dégrader) [ARCH 53].

Archard obtint un volume détaché  $W_d$  par distance cisailée  $d_g$  proportionnel à la force  $F$  appliquée sur cette distance [ARCH 53]. De ce fait, il établit alors la relation :

$$W_d = \frac{K_U d_g F}{D} \quad (1.5)$$

où  $W_d$  est le volume perdu,  $K_U$ , le coefficient d'usure qui dépend des différents corps en contact, c'est à dire des conditions géométriques et thermodynamique lors du contact ainsi que des sollicitations,  $d_g$ , la distance de glissement,  $F$ , la charge appliquée et  $D$ , la dureté du matériau le plus mou. Le modèle d'Archard n'est valable que pour les contacts secs (détachement de particules solides).

Toutefois, cette loi ne reflète pas la réalité et se révèle difficilement transposable d'un contact à un autre. En effet, la variation du coefficient d'Archard  $K$  a été analysé par Lim et Ashby [LIM 87] pour un contact acier-acier. Il en résulte que, pour un même couple de matériaux en contact et pour différentes conditions de contact, le coefficient  $K$  peut avoir des valeurs très différentes. Or, le volume perdu lors de l'usure ne dépend pas que des paramètres donnés dans la loi d'Archard mais d'autres paramètres (température, conditions environnementales, ...) devraient également être considérés.

Pour quantifier l'usure, il est possible de se rapporter au taux d'usure qui est défini comme l'expression de la perte de matière en fonction de la distance parcourue [CART 01]. L'usure peut aussi être évalué par mesures de pertes de masse ou en épaisseur de matériaux. Au delà de cette évaluation quantitative, il semblait indispensable d'établir des cartes d'usure suivant les types de matériaux en contact et les sollicitations subies [HENT 16].

Une corrélation a été remarquée entre les niveaux de sollicitations thermiques (doux, modéré, sévère) et le taux d'usure qui augmente avec la sévérité de la sollicitation [HENT 16]. On parle alors de sévérité de l'usure qui a été défini par trois niveaux (parfois appelés aussi régimes d'usure [LEWI 04]) :

- douce : les surfaces restent lisses et les particules sont de l'ordre du micromètre,
- sévère : les surfaces des corps sont modifiées, la taille des particules sont au-delà de 100 micromètres,
- catastrophique : la durée de vie est très réduite.

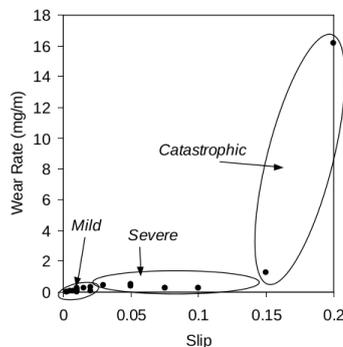


FIGURE 1.10 – Taux d'usure VS glissement [LEWI 04].

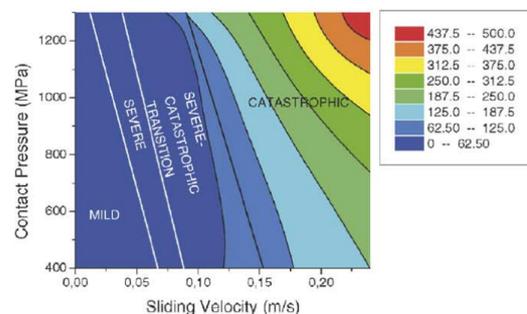


FIGURE 1.11 – Carte des coefficients d'usure [LEWI 04].

La recherche de ces régimes d'usure permet d'appréhender les types de sollicitations pour lesquels le niveau d'usure peut être doux ou, au contraire, catastrophique [LEWI 04]. Les figures 1.10 et 1.11 illustrent un exemple de ces régimes (pour des matériaux et sollicitations définis), pour, respectivement, le taux d'usure en fonction du glissement et la carte des coefficients d'usure suivant les sollicitations pression et vitesse. D'autres cartes d'usure ont été réalisées suivant des conditions d'essais adéquats [LIM 87].

Bien que ces cartes d'usure basées sur le modèle d'Archard sont utilisés dans de nombreux problèmes industriels pour prédire le comportement des matériaux en contact, ce modèle reste empirique. Ce n'est que bien plus tard que, afin d'expliquer l'influence des divers facteurs sur le comportement tribologique du contact, Godet proposa une vision du contact comme un modèle à trois corps [GODE 84] afin de prendre en compte le rôle de l'interface dans la dégradation des corps en contact.

### (b) Modèle à trois corps

Dans les années 1970, Godet introduisit la notion de troisième corps (interface entre les deux corps en contact) et de triplet tribologique [FREN 86, GODE 84, GODE 90].

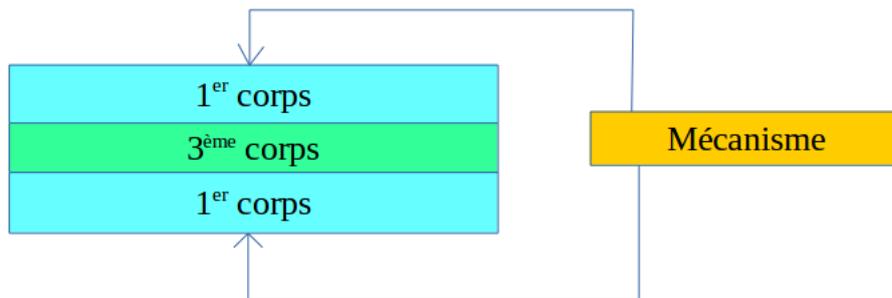


FIGURE 1.12 – Triplet tribologique [GODE 84].

Le triplet tribologique (cf. fig. 1.12) correspond aux premiers corps en contact (roue, rail, semelle, disque, garniture), au troisième corps situé dans l'interface et au mécanisme qui maintient les premiers corps en contact. Ce nouveau concept permet une compréhension accrue des phénomènes de frottement et d'usure. Le troisième corps sépare les premiers corps, pouvant ainsi limiter l'usure, il transmet la charge, permet d'accommoder la vitesse ou encore d'évacuer la chaleur du contact. De plus, il est considéré comme un traceur des conditions de contact [GODE 84].

En 1988, Berthier complète la vision de Godet en amenant la notion de circuit tribologique [BERT 88]. Lorsque les premiers corps sont mis en mouvement, il est possible de considérer que le troisième corps s'écoule de même façon qu'un fluide (cf fig. 1.13), mais sans pour autant connaître les équations qui décrivent son comportement.

La circulation des débits du troisième corps fait intervenir un débit source  $Q_s$  qui est l'apport de particules extérieures  $Q_s^e$  (troisième corps artificiel) et le détachement de particules de premiers corps  $Q_s^i$  (troisième corps naturel). Le débit interne  $Q_i$  est le débit du troisième corps entre les deux surfaces des premiers corps. Le débit d'éjection  $Q_e$  représente les particules de troisième corps s'échappant du contact. Celui-ci est séparé entre  $Q_r$  et  $Q_u$ .  $Q_r$  étant le débit de recirculation concernant les particules réintroduites dans le contact et  $Q_u$ , le débit d'usure concernant les particules définitivement perdues pour le contact.

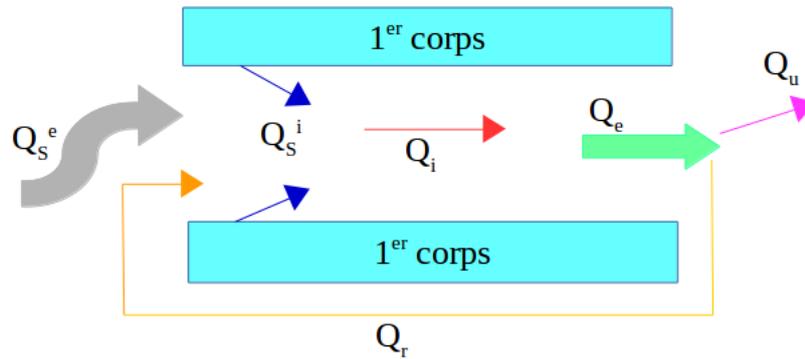


FIGURE 1.13 – Circuit tribologique [BERT 88].

Étudier les contacts par un modèle à trois corps (triplet) et l'interface par des débits de matière (circuit) permet d'appréhender davantage les phénomènes ayant lieu au niveau local des particules et qui conduisent à des pertes de matière des matériaux de freinage.

### (c) Influence sur l'aspect mécano-électrique

L'usure a une influence dans l'aspect mécano-électrique d'un contact. De même façon que pour l'aspect mécano-thermique, mécanique et électrique sont intimement liés puisque c'est au travers de surfaces spécifiques que peut se propager l'électricité. L'objectif est ici de comprendre la façon dont l'électricité se propage à travers le troisième corps ainsi que la résistance électrique de contact qui doit être la plus faible possible pour permettre une bonne conduction électrique.

L'interface constituée de débris (i.e. le troisième corps) va donc jouer le rôle d'un film isolant. De ce fait, les équations précédentes (éq. 1.2 et 1.3) peuvent être étendues.

Pour une déformation élastique, la résistance devient :

$$R_c = \frac{\rho_e e}{\pi a^2} = \frac{\rho_e e}{\pi ((3R^*/4E^*)^{1/3} F_n^{1/3})^2} \quad (1.6)$$

Et pour une déformation plastique :

$$R_c = \frac{\rho_e e}{\pi a^2} = \frac{\rho_e e}{\pi \left( \frac{F_n}{\pi P(F_n)} \right)^2} \quad (1.7)$$

Les particules de semelles qui sont évacuées du contact roue-semelle sont capturées par le contact roue-rail. L'électricité se propage alors entre ces particules de troisième corps. Pour illustrer cela, un exemple de circuit tribologique concernant l'ensemble roue, semelles, rail est donné en figure 1.14.

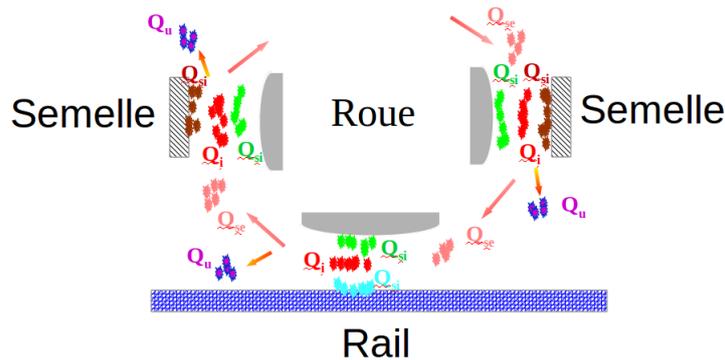


FIGURE 1.14 – Circuit tribologique entre roue, rail et semelles.

Sur cet exemple, pour tous contacts, les débits sources internes proviennent des corps en contact. Les débits internes représentent les particules circulant dans le contact. Les débits d'éjection et d'usure représentent respectivement les particules éjectées du contact et les particules perdues pour le contact. Quant aux débits sources externes, ils représentent l'apport de particules du milieu extérieur mais aussi les particules éjectées (et non perdues) des autres contacts. Cet exemple permet de mieux visualiser l'impact des particules de semelles de frein dans le contact roue-rail.

De façon à comprendre le rôle du troisième corps présent entre roue et rail, et composé de particules de semelles, le débit interne semble être le plus intéressant afin de suivre l'évolution de l'interface. Mais d'un point de vue méthodologique, est-il aisé de suivre cette évolution ?

## IV Outils d'analyses tribologiques

Après avoir défini les problématiques d'usure des matériaux de freinage ainsi que les domaines physiques en jeu, il est nécessaire de déterminer la méthode permettant d'analyser au mieux ces contacts tribologiques. Deux types de travaux ont été menés dans la littérature : expérimentaux et numériques dont les avantages sont différents et nécessitent d'être évalués.

## IV.1 Méthodes expérimentales

Dans la littérature, des travaux expérimentaux ont porté aussi sur des aspects multi-physiques pour comprendre les effets produits entre deux corps en contact. Citons en quelques-uns qui illustrent la problématique qui est au cœur de ce mémoire.

Des travaux orientés principalement vers la tribologie ont eu pour objectifs d'analyser le comportement tribologique de matériaux frittés lors d'analyses expérimentales de ces matériaux sur tribomètres [SU 15, SU 15(2), OSTE 10, KOVA 96]. Su & al., en particulier, ont étudié l'évolution du frottement par rapport aux sollicitations et à la proportion des matériaux présents dans les échantillons [SU 15(2)] (cf. fig. 1.15). Ce type de travaux permet d'associer la meilleure proportion de chacun des matériaux au comportement tribologique le plus favorable. Ceci est le cas dans la recherche du rôle des constituants des matériaux de freinage de même façon que dans le cadre de l'usure ou du shuntage.

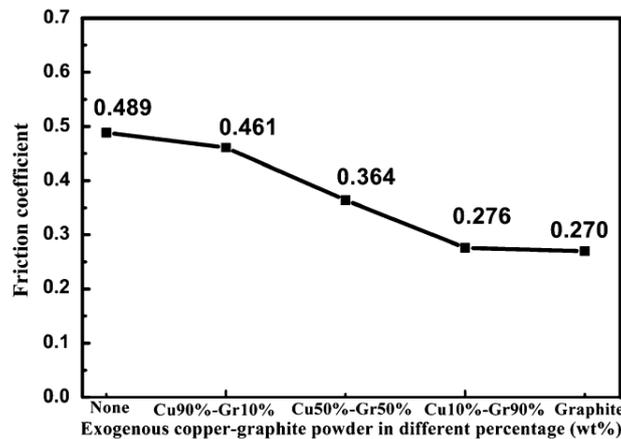


FIGURE 1.15 – Évolution du frottement suivant la proportion de graphite d'après Su & al. [SU 15(2)].

Des travaux orientés vers la thermique ont été menés dans le but de comprendre les phénomènes de conduction thermique se produisant au sein de matériaux en contact [OZDE 10]. Par ailleurs, D'autres travaux se sont davantage intéressés à l'usure des matériaux de freinage ferroviaire [WICK 09, COPI 00].

Wickers, entre autres, a effectué des expérimentations, sur bancs d'essais de freinage, de quatre garnitures G1, G2, G3 et G4 [WICK 09]. La figure 1.16 illustre les gradients thermiques observés par thermographie infrarouge en surface des disques destinés à identifier des "signatures thermiques" associables à chaque garniture.

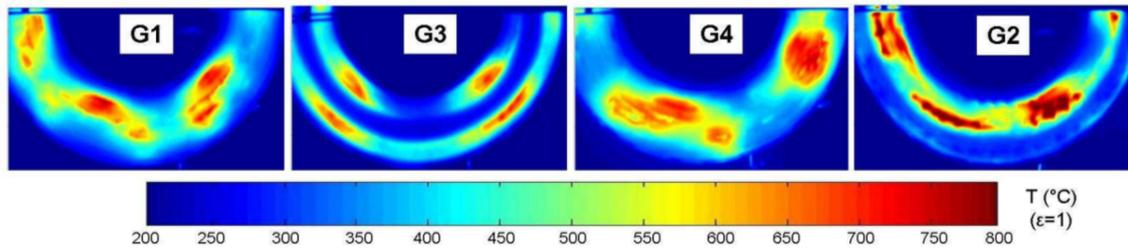


FIGURE 1.16 – Thermogrammes, à l’instant de température maximale, pour quatre types de garnitures, durant un freinage d’arrêt de 300 à 0 km/h, d’après Wickers [WICK 09].

Des travaux orientés électriques ont également été effectués. Les auteurs ont modélisé expérimentalement des comportements assimilables à un troisième corps sec (tel que les particules de semelles de frein présents dans le contact roue-rail). Ceux-ci ont porté sur des chaînes de billes ou de la poudre et ont permis de mettre en évidence, entre autre, le rôle de la pression appliquée sur la résistance électrique [CREY 06, TEKA 11]. Plus proche de la problématique sur le shuntage, Demanche analysa la conduction électrique au sein du troisième corps présent entre roue et rail [DEMA 06], Berthier et Descartes s’intéressèrent également au contact roue-rail pour expliquer l’évolution du troisième corps dans le cadre du shuntage [DESC 08(2)]. La figure 1.17 représente une analyse du troisième corps présent en surface des rails dans le cas d’une tension résiduelle faible (cf. fig. 1.17 (a)) et forte (cf. fig. 1.17 (b)).

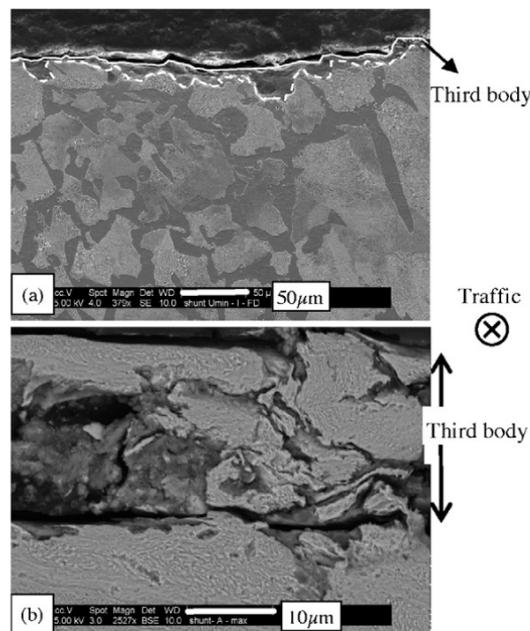


FIGURE 1.17 – Epaisseur du troisième corps présent en surface des rails pour (a) une tension résiduelle faible et (b) une tension résiduelle forte en surface de ceux-ci d’après Descartes & al. [DESC 08(2)].

D'un point de vue général, l'analyse expérimentale peut être effectuée à une échelle globale, ce qui est intéressant pour analyser les phénomènes se produisant en surface et tenir compte de tous les effets environnementaux en présence. Cependant, c'est insuffisant pour analyser "l'intimité" du troisième corps qui est en grande partie liée au confinement du contact. En effet, l'expérimentation en tribologie est limitée car les contacts sont très confinés de par leur faible taille et ne peuvent pas être instrumentés ou très difficilement (cf. fig. 1.18). Si on souhaite mener l'étude en instrumentant physiquement ces différents éléments, cela peut vite devenir complexe [LINC 05] :

- mécanisme (facile à instrumenter) : capteur de forces, accéléromètre, . . . ,
- premiers corps (difficile à instrumenter) : instrumentation sans contact, . . . ,
- troisième corps (Quasi impossible à instrumenter) : modélisation numérique ?

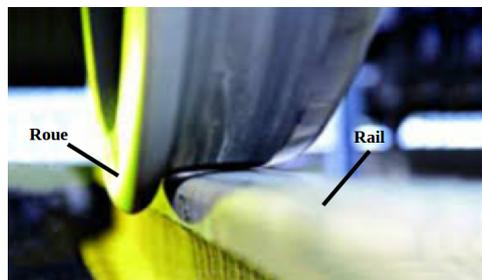


FIGURE 1.18 – Contact confiné entre roue et rail [ENCY 17].

Ce confinement du contact, qui rend difficile l'analyse des constituants au niveau local conduit à choisir une méthode d'analyse numérique pour mener à bien ces travaux.

## IV.2 Méthodes numériques

Bien que les méthodes expérimentales permettent de comprendre un grand nombre de phénomènes se déroulant à une échelle plus globale, elles demeurent complexes à mettre en œuvre à l'échelle du troisième corps. Dans ce cas, il semble nécessaire de s'orienter vers la modélisation numérique.

Lorsqu'on parle simulation de comportement mécanique, on pense souvent à la méthode par éléments finis (FEM). Cette méthode est très utilisée pour simuler le comportement de structures, aussi bien en statique qu'en dynamique. Toutefois, elle n'est efficace que pour des milieux continus tel que les premiers corps par exemple [CAO 11].

Pour les milieux discontinus, où les mêmes règles ne peuvent s'appliquer, c'est la méthode des éléments discrets (DEM) qui prévaut. Elle trouve son origine dans la méthode des éléments distincts (Cundall [CUND 92]) permettant de représenter le comportement général d'un ensemble constitué d'éléments distincts. Couramment utilisée pour modéliser les milieux divisés, cette méthode permet de travailler à différentes échelles et avec des propriétés physiques différentes [CAO 11].

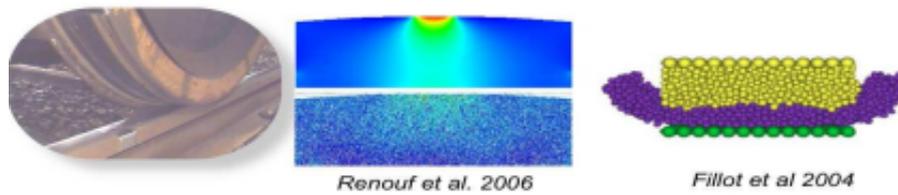


FIGURE 1.19 – Exemple de modélisation par DEM.

Ce type de méthode a déjà fait ses preuves, comme pour le contact roue-rail (cf. fig. 1.19) [CAO 11, RENO 08]. Il est alors possible de modéliser l'écoulement du troisième corps ainsi que la dégradation des premiers corps [RENO 08, RIVI 15, ZENG 16, CHAM 14].

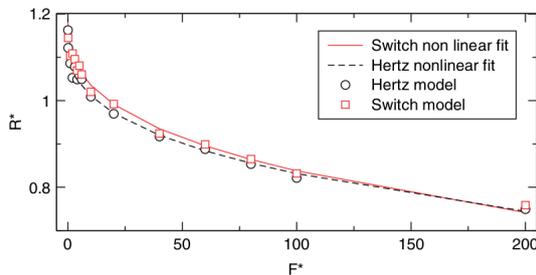


FIGURE 1.20 – Évolution de la résistance électrique en fonction de la force appliquée d'après Renouf &amp; al. [RENO 08].

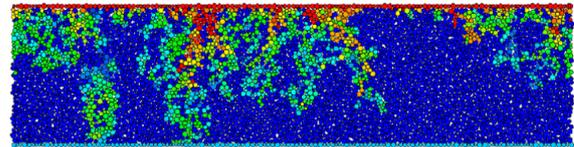


FIGURE 1.21 – Représentation numérique de la propagation d'électricité entre roue et rail d'après Descartes &amp; al. [DESC 08(2)].

Renouf et Zeng [RENO 15, ZENG 16(2)], principalement, ont mené des analyses sur la conduction électrique par éléments discrets et qui sont directement lié à la problématique du shuntage (conduction électrique dans l'interface, proportion de particules, ...) (cf. fig. 1.20 et 1.21). Ce type d'analyses permet de s'intéresser plus spécifiquement à l'écoulement du troisième corps (débit interne) et de relier la constitution du troisième corps ainsi que les propriétés locales des constituants au comportement mécano-électrique de l'interface.

Renouf, Zeng [RENO 15, ZENG 16(2)] à nouveau mais également Champagne et Rivière [CHAM 14, RIVI 15] se sont intéressés à modéliser la dégradation de matériaux en contact très similaire aux contacts de freinage ferroviaire dont il est question dans ce mémoire (dégradation, circuit tribologique, ...). La figure 1.22 illustre la dégradation d'un matériau sain (en rouge) vers le troisième corps (en bleu) à travers la variable d'endommagement (explicité au chapitre 2) (cf. fig. 1.22 (a)) ainsi que l'évolution de la température au sein du troisième corps (cf. fig. 1.22 (b)). Ce type d'analyse peut permettre d'introduire le débit source (dégradation du matériau) et le débit d'usure (éjection définitive des particules hors du contact).

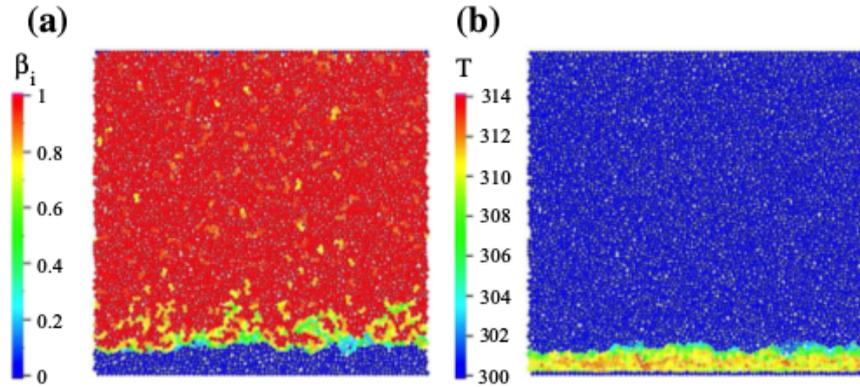


FIGURE 1.22 – Représentation (a) de la variable d'endommagement  $\beta_i$  et (b) de la température d'après Rivière [RIVI 15].

Ces méthodes par éléments discrets ont montré une très bonne corrélation entre les résultats numériques obtenus et les résultats expérimentaux issus de la littérature. Elles permettent d'analyser l'évolution des particules de manière distincte, à l'échelle globale de l'échantillon modélisé comme à l'échelle locale des interactions. Il est possible de découpler les paramètres afin d'étudier plus précisément le rôle de chacun d'eux. Enfin, l'analyse multi-physique est aisée avec ce type de méthode.

Cependant, ces méthodes numériques sont qualitatives et peuvent essentiellement représenter les tendances d'évolution qui pourraient être observées dans un milieu réel mais pas les comportements réels en tant que tels. Toutefois, comparées aux méthodes expérimentales, les méthodes numériques ont des avantages indéniables pour les travaux menés au cours de cette thèse. Celles-ci sont décrites dans le chapitre 2.



# Chapitre 2

## Cadre numérique

### I Introduction

Pour rappel, l'objectif de ce travail est de proposer une analyse locale de l'impact de l'usure dans un contact ferroviaire. De ce fait, on souhaite pouvoir prendre en compte la complexité d'un contact aussi bien d'un point de vue microstructure que d'un point de vue phénomènes physiques impliqués. Naturellement, les phénomènes mécano-thermiques siégeant au cœur d'un contact doivent être modélisés mais aussi les aspects mécano-électriques pour tous les problèmes liés au shuntage.

De cette étude locale, on souhaite ainsi modéliser la dégradation, l'usure du matériau, la génération de chaleur lors du cisaillement ainsi que la propagation de chaleur dans l'échantillon et la conduction d'électricité à travers un troisième corps dynamique. Ceci doit être effectué dans des conditions mécaniques inhérentes au freinage (pression, vitesse) afin de déterminer le comportement tribologique d'un point de vue local dans le but de remonter au circuit tribologique.

De ce fait, il faut pouvoir modéliser l'écoulement du troisième corps avec ou sans dégradation des premiers corps et avec prise en compte des phénomènes multi-physiques. Les méthodes par éléments discrets, introduites à la fin du chapitre précédent, sont les méthodes les plus en adéquation avec les besoins cités précédemment. Par le biais de ces méthodes, le matériau peut être représenté (discrétisé) par des particules rigides représentant des volumes de matière élémentaires et indéformables. Au travers de propriétés spécifiques, les premiers et troisième corps peuvent évoluer et se dégrader en leurs constituants élémentaires. Les méthodes numériques par éléments discrets utilisées dans le cadre de ce travail sont décrites dans la suite de ce chapitre.

Les méthodes par éléments Discrets (ou DEM pour "Discrete Element Method") ont été développées pour résoudre des problèmes liés aux milieux divisés, pour décrire des problèmes où la mécanique des milieux continus n'est plus appropriée (sols [TING 89], céréales [JIAN 05], avalanches rocheuses [CUND 92], ...). Les méthodes par éléments

discrets ont ensuite été étendues à d'autres domaines d'applications comme la propagation de fissures dans les matériaux [PERA 05] ou encore la dégradation de matériaux sous sollicitations dynamiques [RENO 11(2)].

De nombreuses approches par éléments discrets existent, et le but n'est pas de les référencer ici. Le lecteur pourra se référer à des ouvrages de la littérature pour apprécier les différences entre les différentes méthodes [RENO 04(2)]. Dans la suite des travaux, c'est l'approche "Non Smooth Contacts Dynamics" (NSCD) ou "Dynamique des Contacts Non Régulière" qui est retenue, à la vue des différents résultats obtenus avec cette approche dans des contextes tribologiques. On trouvera une synthèse non exhaustive dans [RENO 15] ainsi que dans de nombreux travaux de thèses référencés.

## II Aspects mécaniques

### II.1 De l'approche globale vers l'approche locale

La méthode éléments discrets utilisée dans le cadre de ces travaux est basée sur l'approche NSCD introduite par Moreau [MORE 88] pour modéliser l'évolution de corps rigides et étendue aux corps déformables par Jean [JEAN 99] afin de prendre en compte la déformation des objets. Cette méthode est basée sur une intégration implicite de l'équation de la dynamique. Une présentation des grandes lignes de la méthode est exposée dans la suite afin de comprendre davantage la façon dont sont gérées les éléments d'un point de vue mécanique ainsi que les lois d'interaction qui sont utilisées à des fins tribologiques.

Comme toute approche par éléments discrets, la méthode repose sur trois grandes parties :

- une détection des contacts entre éléments,
- une intégration temporelle des équations de la mécanique,
- un calcul des forces d'interaction entre éléments.

Le premier point est indépendant de l'approche NSCD. La détection des contacts utilisées est une méthode de boîtes qui s'effectue à deux niveaux : un niveau grossier permettant de trier l'ensemble des éléments de l'échantillon, fournissant ainsi une liste de contacts potentiels, et un niveau fin calculant les informations au niveau de chaque contact effectif (dans le cadre de ces travaux, les éléments en contact sont des disques au comportement rigide et les contacts sont ponctuels<sup>1</sup>).

Ce sont les deux derniers points qui sont liés à la méthode NSCD. Le but principal de la méthode est de traiter contacts et chocs de façon simultanée et au cours du même pas de temps [JEAN 99]. Le nombre de contacts étant beaucoup plus important que le

---

1. Une surface effective entre deux éléments en contact est déterminée.

nombre d'éléments, la philosophie générale est donc de séparer l'échelle des éléments en contact (globale) de celle des contacts elle-même (locale). Les échelles globale et locale sont liées par deux opérateurs,  $\mathbb{H}$  et  $\mathbb{H}^*$  ( $\mathbb{H}^*$  étant la transposée de  $\mathbb{H}$ ), permettant de transférer l'information d'une échelle à l'autre. L'opérateur  $\mathbb{H}$  permet de relier les forces de contact locales, notées  $\mathbf{r}$ , aux forces globales, notées  $\mathbf{R}$ , portées par les éléments. La même relation existe entre les vitesses relatives au contact, notées  $\mathbf{v}$ , et les vitesses des éléments, notées  $\dot{\mathbf{q}}$ , dans le repère de référence. Ces relations peuvent s'exprimer par le système suivant :

$$\begin{cases} \mathbf{R} = \mathbb{H}\mathbf{r} \\ \mathbf{v} = \mathbb{H}^*\dot{\mathbf{q}} \end{cases} \quad (2.1)$$

La seule inconnue inhérente au problème mécanique est la loi d'interaction entre les paramètres locaux  $\mathbf{r}$  (position) et  $\mathbf{v}$  (vitesse), cette loi dépend des phénomènes physiques à modéliser.

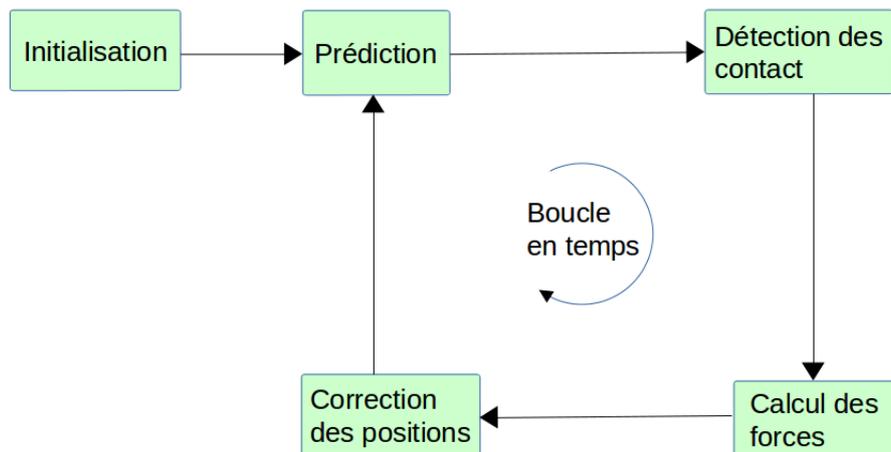


FIGURE 2.1 – Algorithme général d'une approche par DEM.

Plusieurs algorithmes existent pour la résolution de problèmes multi-contact (cf. fig. 2.1) dont l'algorithme de type Gauss-Seidel Non-Linéaire (NLGS) utilisé ici. Ce dernier permet l'utilisation de nombreuses lois d'interaction pour gérer les contacts (robustesse et gestion contact par contact). Le lecteur pourra, si il le souhaite, se référer aux travaux de Renouf & al. pour plus d'informations sur cet algorithme [RENO 04].

Les lois d'interaction utilisées dans le cadre de ce travail sont définies au cours de la partie suivante.

## II.2 Lois d'interaction

La tribologie est un domaine où les méthodes DEM deviennent de plus en plus utilisées. L'interface peut être représentée comme une collection de particules plus ou moins hétérogènes indépendamment les unes des autres. Toutefois, cela ne permet pas de prendre en compte tous les éléments d'un milieu réel. L'amalgame peut être fait quant à la similarité entre particules réelles de troisième corps réel et particules numériques. Cependant, la forme et la dimension précise d'une particule réelle de troisième corps ne peuvent être pleinement établies sans pouvoir instrumenter le troisième corps et analyser le comportement mécanique de ces particules. C'est pourquoi les particules numériques sont vues comme des éléments de discrétisation et ne sont pas représentatives d'une particule réelle. De ce fait les lois d'interaction utilisées doivent pouvoir traduire les différents états d'une interface et ainsi traduire la cohésion, l'endommagement, l'adhésion, etc. De ce fait, conformément au triplet tribologique, le choix des interactions va dépendre de l'appartenance des particules aux premiers ou au troisième corps.

### (a) Interactions au sein des premiers corps

Pour modéliser la dégradation des premiers corps vers la création d'un troisième corps, il faut que la collection d'éléments ait un comportement cohésif au sens où on souhaite conférer à l'ensemble un caractère continu. Différents modèles existent dans la littérature pour reproduire un tel comportement [RENO 06, ANDR 12]. Dans le contexte des travaux de cette thèse, un modèle de zones cohésives (ou "Cohesive Zone Model") est utilisé, appelé par la suite "loi CZM". La loi CZM utilisée est de type RCC [RAOU 99] (cf. fig. 2.2).

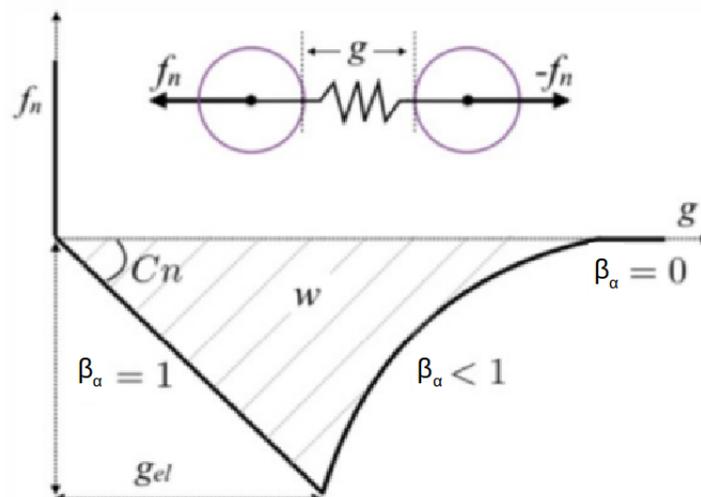


FIGURE 2.2 – Forme de la loi CZM type RCC [PERA 08].

Cette loi permet de modéliser la propagation de fissures dans les matériaux et la rupture de liaisons conduisant les particules de premiers corps à intégrer le troisième corps. La figure 2.2 illustre la forme de la loi CZM, représente l'évolution de la force cohésive en fonction de la distance (gap) entre particules et dépend de quatre paramètres principaux :

- les raideurs dans les directions normales  $C_n$  et tangentielles  $C_t$ ,
- un paramètre de viscosité  $b$ ,
- l'énergie de décohésion  $w$ .

Les raideurs normales  $C_n$  et tangentielles  $C_t$  sont définies afin d'attribuer un comportement élastique linéaire réversible à l'interaction. Et c'est pourquoi l'intervalle entre deux particules est représenté par un ressort (cf. fig. 2.2). Le paramètre d'amortissement intervient au delà d'une certaine distance critique  $g_{el}$  et confère à l'interaction un comportement plastique non linéaire et irréversible ainsi qu'une dépendance à la vitesse de chargement. L'énergie de décohésion  $w$  est l'énergie nécessaire pour rompre complètement une liaison qui, associé à la raideur  $C_n$ , déterminent l'intervalle de déformation élastique  $g_{el}$  comme :

$$g_{el} = \sqrt{\frac{w}{C_n}} \quad (2.2)$$

Les composantes normales  $f_n$  et tangentielles  $f_t$  de la force cohésive sont reliés aux paramètres locaux :

$$\begin{cases} f_n = S^*(C_n \beta_\alpha^2 g_n) \\ f_t = S^*(C_t \beta_\alpha^2 g_t) \end{cases} \quad (2.3)$$

avec,  $S^*$ , la surface effective entre deux éléments en contact.  $\beta_\alpha$  est la variable d'endommagement sans dimension et dont l'intervalle de valeur est compris entre 0 et 1. Lorsque la liaison est élastique, sa valeur correspond à 1 (liaison saine). Si la liaison est endommagée, sa valeur est inférieure à 1, strictement. Lorsque la liaison est brisée, sa valeur est 0.

La valeur de  $\beta_\alpha$  est calculée au travers de la loi CZM qui prend en compte les paramètres locaux [RAOU 99] :

$$\beta_\alpha = \text{Min}\left(1; \frac{w}{C_n g_n^2 + C_t g_t^2}\right) \quad (2.4)$$

Cet endommagement est actualisé à chaque pas de temps permettant ainsi de suivre la progression de l'intégrité du milieu au cours du temps.

**(b) Interactions entre particules de troisième corps**

Lorsque les liens CZM sont rompus ( $\beta_\alpha = 0$ ), les particules sont soumises à une autre loi. Cette loi doit traduire le comportement du troisième corps. Dit autrement, on souhaite, à travers cette loi, que l'ensemble élément/loi d'interaction numérique représente l'ensemble de particules de troisième corps. Cette loi reste encore phénoménologique, mais à défaut de connaître le comportement des particules de troisième corps, on peut appréhender "avec les mains" leur comportement. De ce fait, la loi choisie est une loi unilatérale cohésive de type Maugis-Dugdale (cf. fig. 2.3), souvent utilisée dans la modélisation de troisième corps solides [RENO 08, CHAM 14]. Cette loi s'appuie sur une force de cohésion  $\gamma$  représentant la physico-chimie du milieu et sur une distance d'activation notée  $d_w$ .

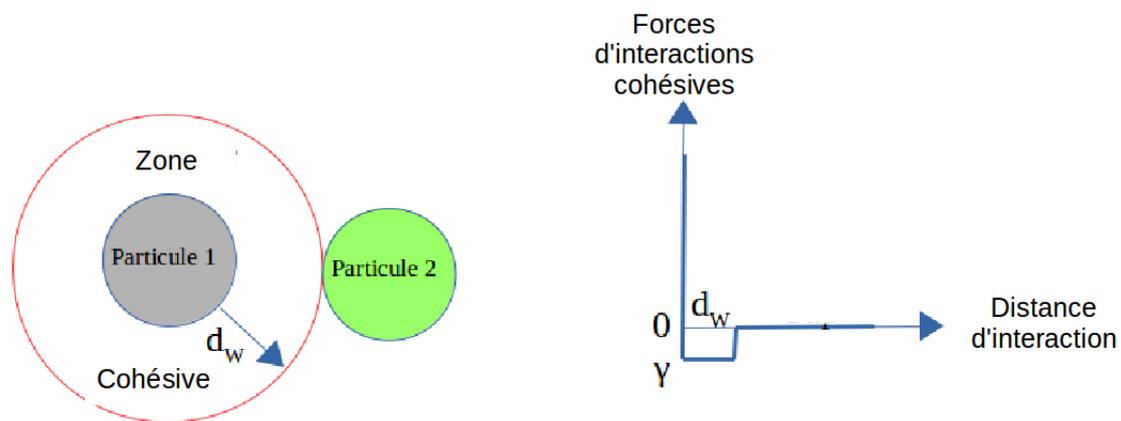


FIGURE 2.3 – Forme de la loi unilatérale cohésive (loi WET).

Il est ainsi possible de conférer à la couche une résistance à la compression et ainsi transférer la charge normale d'un premier corps à un autre. La partie cohésive de la loi permet de maintenir les particules en contact. Cette loi apporte une assez bonne approximation des comportements réels (similaire à la loi de Van der Waals) sans complexifier le problème avec un trop grand nombre de paramètres [RENO 11].

De par l'unilatéralité de la loi,  $g$  est toujours supérieur ou égal à 0. Une telle loi peut être décrite par l'ensemble des inégalités [RENO 10] :

$$(F_n + \gamma) \geq 0 \quad g \geq 0 \quad (F_n + \gamma) \cdot g = 0 \quad (2.5)$$

Lorsque la distance entre particules, notée  $g$ , est supérieure à la distance limite de cohésion  $d_w$ , aucune force d'attraction n'agit sur les particules. Lorsque la valeur de  $g$  est inférieure à  $d_w$ , la cohésion agit comme une force tendant à rapprocher les particules. Lorsque  $g$  est égal à zéro, il y a contact entre particules.

### III Aspects thermiques

#### III.1 Approche globale

De nombreux travaux permettent de modéliser des échanges thermiques dans un milieu divisé [VARG 01], mais un peu moins à des fins tribologiques [RENO 11]. Les modèles utilisés dérivent des travaux de thèse de Rivière [RIVI 15(2)]. D'un point de vue global, la figure 2.4 illustre les différents transferts thermiques existants.

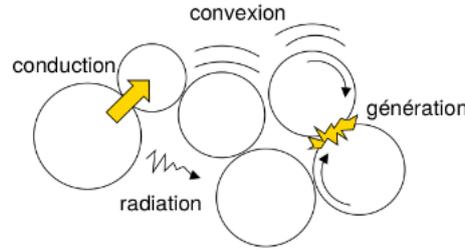


FIGURE 2.4 – Transferts thermiques.

Il y a bien sûr les phénomènes qui génèrent de la chaleur (endommagement, frottement ...), puis la transmission de cette dernière par convection, conduction ou encore radiation. Ces transferts dépendent du milieu, des matériaux étudiés, de leur état de surface, entre autres, ou encore de l'échelle à laquelle l'étude est effectuée (premier corps, troisième corps).

Pour traduire ces différentes physiques, on peut utiliser le système d'équations suivant. Une particule  $i$  peut subir les différents aspects thermiques cités précédemment et donc, l'évolution de la température d'une particule  $i$  est donnée par la loi de Fourier [RIVI 15] :

$$m_i c_i v_i \frac{dT_i}{dt} = Q_{gen}^i + Q_{cond}^i + Q_{conv}^i + Q_{rad}^i \quad (2.6)$$

où  $m_i$  désigne la masse de la particule  $i$ ,  $c_i$ , sa capacité thermique massique et  $v_i$ , son volume. Il est supposé que ces trois valeurs sont constantes au cours du temps.  $Q_{gen}^i$  représente le flux de génération,  $Q_{cond}^i$  le flux de conduction,  $Q_{conv}^i$ , le flux de convection et  $Q_{rad}^i$ , le flux de radiation.

La loi de Fourier est une loi phénoménologique qui n'a jamais été théoriquement démontrée. Celle-ci peut ne pas être vérifiée si le gradient de température est trop élevé, ne satisfaisant pas la relation linéaire entre gradient et flux thermiques, ou si le gradient de température varie trop rapidement, le flux thermique pouvant s'établir avec du retard.

Dans les applications de type tribologique étudiées ici, les flux convectifs et radiatifs sont négligeables par rapport aux flux conductifs (fortes contraintes mécaniques à l'interface). L'équation ((2.6)) peut alors être simplifiée comme ceci [RIVI 15(2)] :

$$m_i c_i v_i \frac{dT_i}{dt} = Q_{gen}^i + Q_{cond}^i \quad (2.7)$$

Cependant les termes de conduction et de génération vont être liés au modèle mécanique sous jacent. L'équation 2.7 doit être traitée différemment si elle considère un milieu équivalent à un milieu continu (premiers corps) ou si elle considère un milieu discontinu tel que le troisième corps.

### III.2 Approche locale

#### (a) Au sein des premiers corps

En ce qui concerne les premiers corps, il n'y a pas de génération thermique car les éléments sont fixes au niveau des premiers corps. Au niveau de la conduction au sein des premiers corps, certains auteurs [RIVI 15, HADD 14, HAHN 11] ont contribué à mettre en évidence la proportionnalité entre le flux de conduction, la différence de température et la conductance thermique équivalente :

$$Q_{cond}^{ij} = K^c (T_j - T_i) \forall i, j \in (1, N) \quad (2.8)$$

L'expression de la conductance thermique équivalente  $K^c$  est celle établie et validée par Rivière & al. [RIVI 15(2)] :

$$K^c = \frac{\lambda \pi}{Z} \quad (2.9)$$

où  $\lambda$  désigne la conductivité thermique et  $Z$  le nombre moyen de voisins. L'expression de la conductivité thermique équivalente est obtenue en comparant le comportement d'un milieu discrétisé par la méthode des éléments discrets et par la méthode des éléments finis.

#### (b) Au sein du troisième corps

Au niveau du troisième corps, les mouvements entre particules dissipent de l'énergie qui se transforme entièrement en chaleur [RENO 11]. Le terme de l'équation de Fourier correspondant à la génération de chaleur entre éléments de troisième corps est :

$$Q_{gen}^{ij} = \mathbf{r}^{ij} \cdot \mathbf{v}^{ij} \quad (2.10)$$

où  $\mathbf{r}_{ij}$  et  $\mathbf{v}_{ij}$  représentent respectivement les réactions et vitesses définies au repère local. L'énergie mécanique produite alors est supposée être équitablement répartie entre les deux éléments en contact. Il est supposé, de plus, que l'énergie dissipée se transforme entièrement en chaleur.

Après avoir établi la génération de chaleur, un intérêt est porté à la conduction de chaleur au sein du troisième corps. Contrairement à la section précédente, la conductance thermique équivalente  $K^c$  est supposée proportionnelle au rayon de l'aire de contact  $a$ , celui-ci est donné par :

$$a = \sqrt{\frac{4R^*F_n}{\pi LE_{eff}}} \quad (2.11)$$

Ce rayon de l'aire de contact (issue du modèle de Hertz [HERT 82] et appliquée à un cas bidimensionnel) est reliée à la force de contact ( $F_n$ ) au travers d'un module de Young effectif ( $E_{eff}$ )<sup>2</sup>, paramètre à intégrer au modèle.

## IV Aspects électriques

### IV.1 Approche électrique globale

Pour tenir compte des caractéristiques électriques du modèle, le réseau de contact est assimilé à un réseau électrique (cf. fig. 2.5) qui se compose en un certain nombre de nœuds (particules) et de branches (interactions) où chaque branche possède sa propre conductivité.

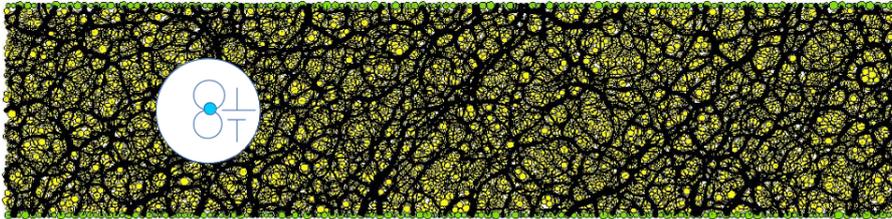


FIGURE 2.5 – Réseau de contacts [RENO 08].

La résolution du problème électrique repose sur la loi d'Ohm et sur la première loi de Kirchhoff (loi des nœuds, conservation des charges). Il faut noter qu'il est nécessaire de connaître les forces d'interaction afin de résoudre le problème électrique et de calculer un potentiel électrique pour chaque contact.

Pour un milieu composé de  $N$  éléments et d'après la loi d'Ohm entre deux éléments en contact, le potentiel électrique  $U$  entre ces deux éléments peut être approché par une équation linéaire :

$$\frac{U_i - U_j}{R_{ij}} = I_{ij} \quad \forall i, j \in [1, N] \quad (2.12)$$

2. Dans le cas de particules rigides, une déformation au contact ne peut être définie (car le contact est ponctuel). Une surface d'échange équivalente par l'intermédiaire de paramètres mécaniques élastiques est alors considérée (tel qu'un module d'Young effectif).

D'après la première loi de Kirchhoff, entre deux éléments en contact, la loi des nœuds au niveau d'un élément  $i$  permet d'écrire une équation linéaire qui relie le potentiel électrique  $U_i$  de cet élément aux potentiels électriques  $U_j$  de ses voisins :

$$\sum_{j \in \mathcal{V}_i} \frac{U_i - U_j}{R_{ij}} = I_{ij} \quad \forall i, j \in [1, N] \quad (2.13)$$

La loi d'Ohm est utilisée principalement pour le contact entre deux éléments et la première loi de Kirchhoff pour la loi des nœuds permettant de relier un élément à ses proches voisins. Pour la suite, il est considéré comme préférable, dans les équations, d'utiliser la conductance électrique  $C_{ij}$  au lieu de la résistance électrique  $R_{ij}$  ( $C_{ij} = \frac{1}{R_{ij}}$ ).

L'équation (2.13) devient alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \in [1, N]} C_{ij}(U_i - U_j) = I_{ij} \quad \forall i \in [1, N] \\ Si \quad j \in \mathcal{L}_i, C_{ij} = \frac{1}{R_{ij}} \\ Si \quad j \notin \mathcal{L}_i, C_{ij} = 0 \end{array} \right. \quad (2.14)$$

$\mathcal{L}_i$  désigne la liste des voisins de  $i$  et  $I_{ij}$  le courant résiduel d'une branche  $ij$ .

Le système (2.14) est un système d'équations à  $N$  inconnues (le potentiel électrique pour chaque élément) et  $N$  équations (la loi des nœuds pour chaque élément). Sous forme matricielle, le système devient :

$$\mathbb{C}U = \mathbb{I} \quad (2.15)$$

De telles équations permettent de construire le problème électrique et de le résoudre par un algorithme itératif tel qu'un algorithme de Gauss-Seidel [RENO 08] ou encore un algorithme de type gradient conjugué [ZENG 16(2)].

Pour résoudre le problème (2.15), il faut déterminer les valeurs des différentes matrices de conductances locales  $\mathbb{C}_{ij}$ . Comme pour les aspects thermiques, le calcul de cette matrice va dépendre du modèle mécanique sous-jacent.

## IV.2 Conductance locale

### (a) Au sein des premiers corps

Comme pour le modèle thermique, une analogie est réalisée entre un modèle discret et un modèle continu afin de définir la conductance au niveau de deux éléments des premiers corps. La stratégie utilisée est celle développée par Zeng dans sa thèse [ZENG 16(2)].

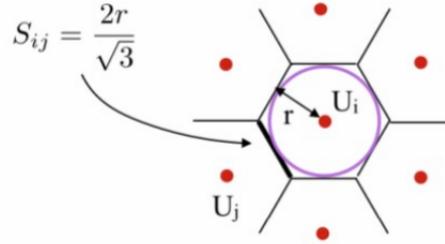


FIGURE 2.6 – Pavage de Voronoi.

Ainsi en utilisant un pavage de Voronoi (cf. fig. 2.6) et en supposant que l'empilement est hexagonal, la conductance équivalente est reliée à la surface de contact effective, faisant intervenir le nombre de coordination  $Z$  et la fraction volumique  $\phi$ . De ce fait la conductance équivalente est donnée par :

$$C_{eq} = \frac{1}{R_{eq}} = \frac{\pi}{\rho Z \phi} \quad (2.16)$$

Dans le cas d'un empilement hexagonal,  $Z = 6$  et  $\phi = \frac{\sqrt{3}\pi}{6}$ , on retrouve alors l'équation précédente avec pavage de Voronoi. De ce fait, la résistance équivalente est calculée pour rendre compte de bonnes valeurs du milieu continu équivalent.

### (b) Au sein du troisième corps

Chaque particule  $i$  et  $j$  possède respectivement une conductance propre  $C_i$  et  $C_j$ , et une conductance mécanique  $C_m$  au niveau du contact. Une conductance équivalente pour le contact  $C_\alpha$  est définie par la relation :

$$C_\alpha = (C_i C_j) / (C_i + C_j + ((C_i C_j) / C_m)) \quad (2.17)$$

Pour chaque contact, le courant électrique  $I$  suit la loi d'Ohm :

$$I = \frac{\Delta U}{R_c} \quad (2.18)$$

où  $R_c$  représente la résistance de contact qui est déterminée par le modèle de constriction de contact électrique classique proposé par Holm [HOLM 81] :

$$R_c = \frac{\rho_e}{2a} \quad (2.19)$$

où  $\rho_e$  désigne la résistivité électrique du matériau constituant les particules et  $a$ , le rayon de la zone de contact apparente. Une telle équation est valable généralement quand  $a \ll r$  ( $r$ , rayon de la particule) et nécessite donc une faible déformation de la géométrie. Pour les petites particules avec une forte contrainte, ce qui est généralement le cas dans

la lubrification du troisième corps, la zone de contact est plus susceptible de se déformer plastiquement qu'élastiquement. Ainsi, Bowden et al. [BOWD 86] démontrèrent que le modèle de Hertz (utilisé dans le cadre thermique) n'était pas applicable à la conduction électrique entre deux cylindres en contact. Pour calculer le rayon de l'aire de contact apparente  $a$ , ils proposèrent alors la formule suivante :

$$a = \sqrt{\frac{F_n + \gamma}{\pi Y}} \quad (2.20)$$

où  $F_n$  est la force normale au contact et  $Y$  la limite d'élasticité du matériau. Une telle équation est valable pour la zone de contact apparente. Suite à la détermination du rayon de la surface de contact, la résistance de constriction de Holm peut être exprimée comme :

$$R_c = \frac{\rho_e \sqrt{\pi Y}}{2\sqrt{(F_n + \gamma)}} \quad (2.21)$$

C'est ce dernier modèle qui est utilisée où  $\gamma$  désigne la force de cohésion entre particules de troisième corps.

## V Outil numérique

La plate-forme numérique choisie pour réaliser ces simulations par éléments discrets est LMGC90 (Logiciel de Mécanique Gérant le Contact écrit en fortran 90), d'abord initié par Jean [JEAN 99], elle a été poursuivie par Dubois [DUBO 08]. LMGC90 est une plate-forme destinée à la modélisation d'une large gamme d'objet en interaction. Elle offre aux utilisateurs des comportements mécaniques variés, des lois d'interaction complexes et la possibilité d'un couplage multi-physique et multi-échelle [DUBO 11, BAGN 10].

Cette plate-forme offre ainsi un certain nombre de possibilités telle que la modélisation de corps rigides/déformables, l'utilisation de lois de contact (friction, cohésion, endommagement, ...) ainsi que la possibilité d'un couplage multi-physique (mécanique, électrique, thermique, ...).

LMGC90 est un outil opérationnel qui permet de résoudre divers problèmes. Cet outil fonctionne sur un code DEM étendu, ce qui permet d'aller plus loin, dans la description de modèles, qu'avec les codes DEM classiques (telle que la prise en compte des premiers corps) [DUBO 08].

## VI Conclusion

Dans ce chapitre, la philosophie du modèle éléments discrets a été décrite ainsi que la méthodologie numérique. A présent, il est nécessaire d'analyser les problèmes ferroviaires présentés au chapitre 1.

Le chapitre 3 sera orienté vers la problématique du shuntage et, plus spécifiquement, sur l'impact des constituants de l'interface dans les phénomènes mécano-électriques s'y déroulant. Seul le débit interne y est modélisé, l'intérêt de ces analyses n'étant porté que sur l'écoulement du troisième corps.

La problématique de l'usure des matériaux sera abordée au cours des chapitres 4 et 5. L'endommagement du matériau pour débiter (chapitre 4) où le débit source est introduit. Puis les mécanismes d'usure (chapitre 5) où le débit d'usure vient compléter le circuit tribologique. En ce qui concerne ces deux derniers chapitres, les mécanismes mécano-thermiques se produisant lors de l'usure des matériaux ainsi que les comportements locaux des constituants seront discutés.



# Chapitre 3

## Impact de la composition du troisième corps dans les phénomènes mécano-électriques de l'interface

### I Introduction

#### I.1 Philosophie générale

L'usure des semelles de frein provoque un enrichissement du troisième corps présent entre roue et rail par les particules issues de ces matériaux. En fonction de cette constitution, la résistance électrique du troisième corps séparant le contact entre roue et rail peut évoluer et conduire dans certain cas à un mauvais shuntage.

Au cours de ce chapitre, une analyse mécano-électrique est réalisée afin de relier les grandeurs globales aux propriétés locales de l'interface. Cette interface est considérée comme déjà présente au sein du contact, sans prendre en compte la dégradation des premiers corps. Au sens du circuit tribologique (cf. fig. 3.1), seul le débit interne est ainsi considéré.

Dans le but de comprendre l'impact de la semelle de frein dans la conduction électrique entre roue et rail, le troisième corps considéré est constitué uniquement de particules issues de semelles de frein. Les matériaux modélisés dans cette interface sont représentatifs de matériaux frittés qui sont couramment utilisés pour la fabrication de matériaux de freinage ferroviaire. Les travaux numériques abordant la notion de troisième corps considèrent souvent (pour ne pas dire tout le temps) un troisième corps homogène. Pourtant, dans l'idée d'associer une interface à un milieu divisé, il faut pouvoir prendre en compte le fait que cette interface résulte la plupart du temps d'un mélange de divers composants. Dans ces situations, l'analyse de mélanges est donc indispensable, en particulier à la vue des propriétés radicalement différentes de certains composants (cuivre/graphite par exemple). Ainsi, après le cas modèle d'une interface homogène (composée de graphite), une analyse

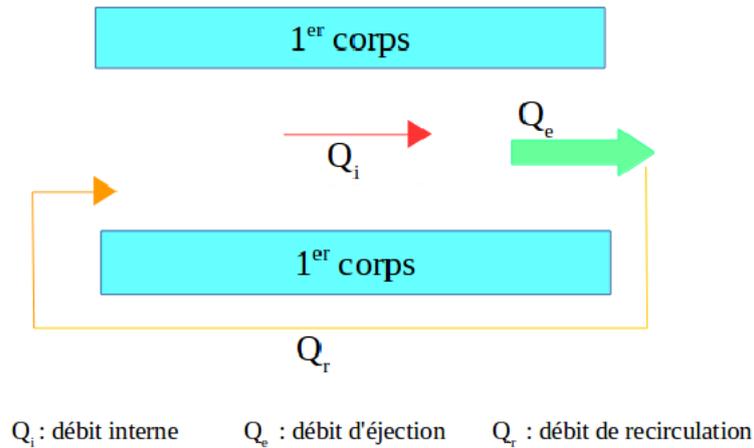


FIGURE 3.1 – Écoulement du troisième corps dans le concept de circuit tribologique.

sera menée sur une interface bi-constituant (graphite et cuivre) en interagissant sur les propriétés locales des matériaux considérés.

## I.2 Echantillon numérique

La figure 3.2 représente le modèle numérique par éléments discrets conçu pour ce travail. Les premiers corps sont modélisés par des parois rigides non déformables et non dégradables dont le matériau est représentatif de l'acier (roue et rail). Le troisième corps est modélisé par un ensemble de particules rigides.

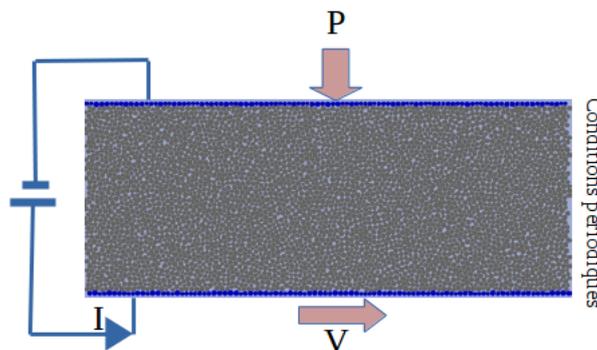


FIGURE 3.2 – Représentation d'un échantillon (cas homogène).

Une pression est appliquée sur la paroi supérieure (poids de la roue sur le rail) tandis qu'une vitesse de cisaillement contrôle la paroi inférieure (résultante de la vitesse d'avancement du train). Le courant électrique se propage de la paroi inférieure vers la paroi supérieure (du rail vers la roue), lesquelles sont soumises à une différence de potentiel

de 1 V entre elles. L'impact de la température est supposée négligeable dans l'interface. Les propriétés mécano-électriques des éléments de troisième corps modélisés ne sont pas modifiés par les phénomènes thermiques qui ne seront donc pas traités au cours de ce chapitre.

Enfin, pour terminer avec les conditions imposées sur le modèle, des conditions périodiques dans le sens de l'écoulement permettent de simuler un contact infini (toutes particules éjectées sont réintroduites par le côté opposé).

Le tableau 3.1 synthétise les paramètres généraux (et fixes) de la modélisation effectuée au cours de ce chapitre.

Materiaux	Graphite	Cuivre
Masse volumique ( $kg/m^3$ )	$2,1 \times 10^3$	$8,9 \times 10^3$
Conductivité électrique ( $S/m^3$ )	$3 \times 10^5$	$5,9 \times 10^7$
Nombre de particules	4529	
Longueur x hauteur ( $m \times m$ )	$(2 \times 10^{-2}) \times (2 \times 10^{-2})$	
Rayon moyen ( $m$ )	$10^{-4}$	
Pas de temps ( $s$ )	$2 \times 10^{-5}$	
Temps de simulation ( $s$ )	0,2	

Tableau 3.1 – Caractéristiques de simulation

Dans la suite du chapitre, sauf contre indication, ce sont ces valeurs qui seront utilisées comme paramètre du modèle.

### I.3 Mesures globales

Afin d'analyser le comportement mécano-électrique de l'interface, un intérêt sera porté à certaines mesures globales, comme le frottement ou la porosité (paramètres d'ordres mécaniques) mais aussi la résistance électrique équivalente (paramètre d'ordre électrique). Au cours d'une simulation, pression et vitesse imposées sont constantes. Chaque simulation effectuée est alors menée jusqu'à ce que le milieu atteigne un état stationnaire, correspondant à un cisaillement complet de l'échantillon. Les valeurs moyennes des mesures globales sont ensuite déterminées dans cet état.

#### (a) Frottement macroscopique

Le coefficient de frottement macroscopique  $\mu$  est le rapport entre forces tangentielles  $F_t$  et normales  $F_n$  :

$$\mu = F_t(t)/F_n \quad (3.1)$$

Dans le but d'analyser l'état mécanique de l'interface, la valeur moyenne de  $\mu$ , notée  $\bar{\mu}$  est déterminée pour chacune des simulations analysées (au cours de l'état stationnaire).

### (b) Porosité

La porosité, complémentaire au coefficient de frottement, permet d'appréhender l'état mécanique du milieu (chaînes de forces). Elle est définie comme étant l'ensemble des vides présents dans l'interface. Cette grandeur est donnée comme le rapport entre les vides présents dans l'échantillon  $V_p$  et le volume total  $V_t$  :

$$\Phi = V_p/V_t \quad (3.2)$$

Il a été jugé préférable de normaliser la porosité  $\phi$  par une valeur de référence  $\phi^*$  qui est la valeur de la porosité à vitesse, frottement local et cohésion locale nuls. Ceci permet de faire abstraction des propriétés géométriques de l'échantillon dans l'évolution de la porosité. C'est ainsi l'évolution du rapport  $\phi/\phi^*$  qui est observé.

### (c) Résistance équivalente

En ce qui concerne l'état électrique, il s'agit de définir une résistance équivalente à l'ensemble du troisième corps et qui est le rapport entre la différence de potentiel entre les deux parois et l'intensité du courant circulant dans le milieu :

$$R_{eq} = \frac{\Delta U}{I} \quad (3.3)$$

## I.4 Analyse adimensionnée

De par l'approche numérique choisie, et l'analogie entre interface tribologique et milieu discontinu, il peut-être intéressant d'utiliser des grandeurs sans dimension liées aux milieux divisés pour analyser ce système.

Pour caractériser le rapport entre l'énergie apportée par le cisaillement et celle induite par la pression appliquée, le nombre inertiel, noté  $I$ , introduit par Pouliquen [POUL 04] est intéressant, même si la notion "d'inertie" peut donner une mauvaise vision du modèle. Ce nombre permet de classer les différents régimes d'écoulement pour un milieu divisé (d'un régime lent (quasi statique) a un régime rapide (dynamique)) (cf. fig. 3.3).

Le nombre inertiel, défini comme le rapport entre le temps de réarrangement des éléments  $d\sqrt{\rho/P}$  et le temps de cisaillement  $1/\dot{\gamma}$ , s'écrit :

$$I = \frac{\dot{\gamma}d}{\sqrt{\frac{P}{\rho}}} \quad (3.4)$$

avec  $\dot{\gamma}$ , le taux de cisaillement,  $d$ , le diamètre des éléments constituant le troisième corps,  $P$ , la pression appliquée et  $\rho$ , la masse volumique des éléments.

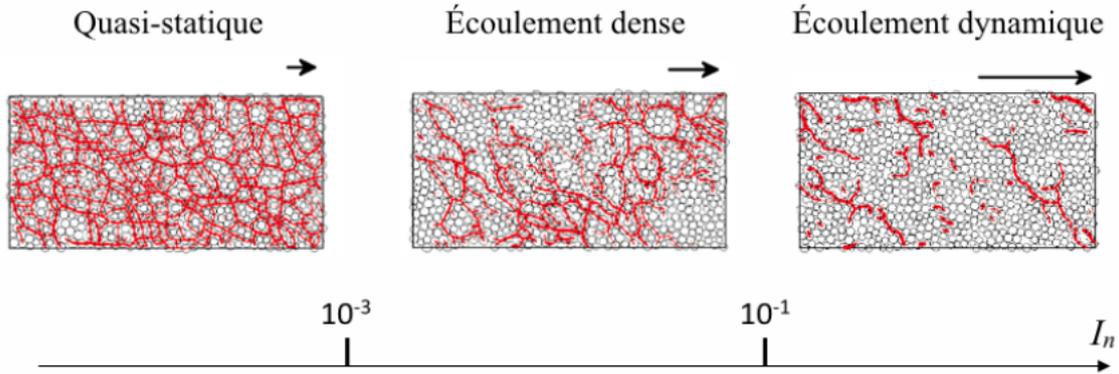


FIGURE 3.3 – Illustration de trois régimes d'écoulement suivant la valeur du nombre inertiel et l'évolution du réseau de contact dans ces trois régimes d'après Rognon et al. [ROGN 06] (les traits représentent les forces normales entre particules).

Connaissant  $d$  et  $\rho$  et ayant les valeurs de  $P$  et  $V$  constantes au cours d'une simulation, il est possible de déterminer le régime d'écoulement pour chaque simulation. Dans le cadre de ce travail, l'écoulement du troisième corps peut être en régime quasi statique ou dense mais pas dynamique (non pertinent dans ce type d'écoulement). Ainsi, il n'est pas nécessaire d'aller au delà de valeur supérieure à  $10^{-1}$  pour le nombre inertiel.

Outre le nombre inertiel, un second nombre sans dimension est utile au cours de ce travail, ce nombre est lié aux interactions locales entre éléments. Pour rappel, la loi régissant les interactions entre éléments numériques de troisième corps est une loi cohésive faisant intervenir une force de cohésion  $\gamma$  et une distance d'attraction  $d_w$ . Ce second nombre sans dimension,  $\eta$ , est l'intensité de cohésion qui intervient afin de pouvoir comparer l'état de cohésion de deux systèmes dont la configuration est différente.  $\eta$  n'est autre que le rapport entre les pressions locales et globales et qui est défini par :

$$\eta = \frac{p_{local}}{P_{global}} = \frac{\gamma/d}{F/L} = \frac{\gamma}{Pd} \quad (3.5)$$

$\eta$  relie la force de cohésion inter-particulaire  $\gamma$  à la pression appliquée au système  $P$ . Il est à noter que les effets locaux deviennent dominant sur les effets globaux lorsque  $\eta$  devient grand.

## II Troisième corps homogène

Pour débiter ce travail, un troisième corps homogène est modélisé. L'analyse proposée fait suite à celle proposée par Zeng [ZENG 16(2)] qui observa l'évolution des paramètres globaux décrits précédemment en fonction du nombre inertiel (modification de pression et vitesse). Cette analyse est complétée ici en regardant l'impact de la cohésion locale sur les mesures globales. Dans cette partie où le matériau modélisé est du graphite, les effets

de la pression, de la vitesse et de la cohésion locale sont analysées. Le frottement local n'est pas considéré au cours de ces analyses car ce dernier n'a qu'une faible influence sur le comportement global contrairement à la cohésion dont l'influence est de premier ordre.

Ces analyses ont pour objectif de comprendre les comportements mécaniques et électriques de la couche de troisième corps suivant les sollicitations  $P$ ,  $V$  (à travers le nombre inertiel  $I$ ) ainsi que les valeurs de cohésion  $\gamma$  à travers l'indice de cohésion  $\eta$ . Une variation des vitesses a été réalisée dans un intervalle de 0,01 à 10 m/s, cette gamme de vitesse a été testée pour trois pressions, 0,5 ; 5 et 50 kPa. Pour chaque couple ( $P$ ,  $V$ ) testé, les valeurs de pression et vitesse sont constantes au cours d'une même simulation. Les nombres inertiels qui en résultent s'étendent sur une plage de  $2 \cdot 10^{-5}$  à  $10^{-1}$ . De même, chaque couple ( $P$ ,  $V$ ) a été testé pour cinq valeurs de  $\eta$ , (0,001 ; 0,01 ; 0,1 ; 1 et 5).

## II.1 Mesures mécaniques

Tout d'abord le frottement global est mesuré en fonction de  $I$  et de  $\eta$  (cf. fig. 3.4). Pour un faible impact de la cohésion, les courbes ont une allure proche des travaux issus de la littérature, tel que décrit par Zeng [ZENG 16(2)] et Da Cruz [DACR 05] :  $\bar{\mu}$  augmente avec le nombre inertiel. La cohésion, lorsqu'elle prend des valeurs élevées, a un impact important sur le frottement global. L'évolution du frottement moyen peut être déterminée par une équation dont  $\bar{\mu}$  est fonction de  $I$  et dont les paramètres  $b$ ,  $a$  et  $\alpha$  sont dépendants de  $\eta$  :

$$\bar{\mu} = b + aI^\alpha \quad (3.6)$$

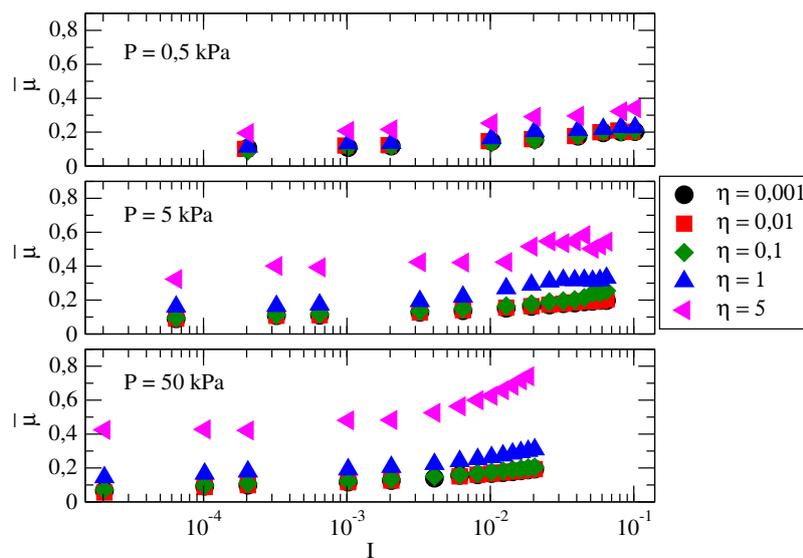


FIGURE 3.4 – Évolution du frottement global en fonction de  $I$  pour différents niveaux de cohésion et pour des vitesses allant de 0,01 à 10 m/s.

Lorsque  $\eta$  augmente, ces trois paramètres augmentent également. Il est à noter, d'autre part, que pour la plus forte valeur de  $\eta$ , l'évolution de  $\bar{\mu}$  est bien plus sensible à la pression que pour les valeurs plus faibles de  $\eta$ .

La porosité (cf. fig. 3.5) est complémentaire au frottement global et augmente avec  $I$ . Des chaînes de forces sont rompues pour les forts nombres inertiels. L'augmentation de la cohésion conduit à la formation d'amas et tend à créer davantage de porosités.

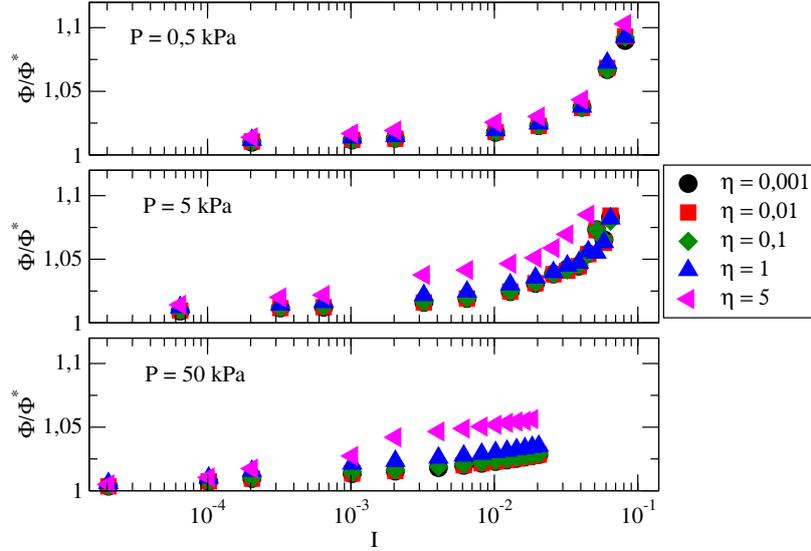


FIGURE 3.5 – Évolution de la porosité en fonction de  $I$  pour différents niveaux de cohésion et pour des vitesses allant de 0,01 à 10 m/s.

$\bar{\mu}$  et  $\phi/\phi^*$  permettent de mettre en évidence l'état mécanique du milieu suivant les contraintes mécaniques subies ainsi que les liens cohésifs entre éléments. D'un point de vue général, une plus forte pression tend à minimiser ces grandeurs globales ( $I$  moins élevé) tandis qu'une forte vitesse les maximise ( $I$  plus élevé). Ces observations vont dans le sens de la définition du nombre inertiel. Pour une faible valeur de  $\eta$ , l'évolution des grandeurs dépend surtout de la pression globale. Lorsque  $\eta$  devient trop élevé, la pression locale prend le dessus sur la pression globale et les effets cohésifs peuvent modifier grandement l'état mécanique.

## II.2 Mesures électriques

Après les grandeurs mécaniques, observons maintenant l'évolution des grandeurs électriques. Pour illustrer l'état électrique, le champ de potentiel électrique est observable sur la figure 3.6, illustrant différentes configuration en fonction du nombre inertiel  $I$  et de l'indice de cohésion  $\eta$ .

Pour une faible valeur de  $I$ , la conduction électrique est plus aisée que pour une valeur de  $I$  plus élevée pour laquelle les chaînes de forces sont en moins grand nombre, limitant le

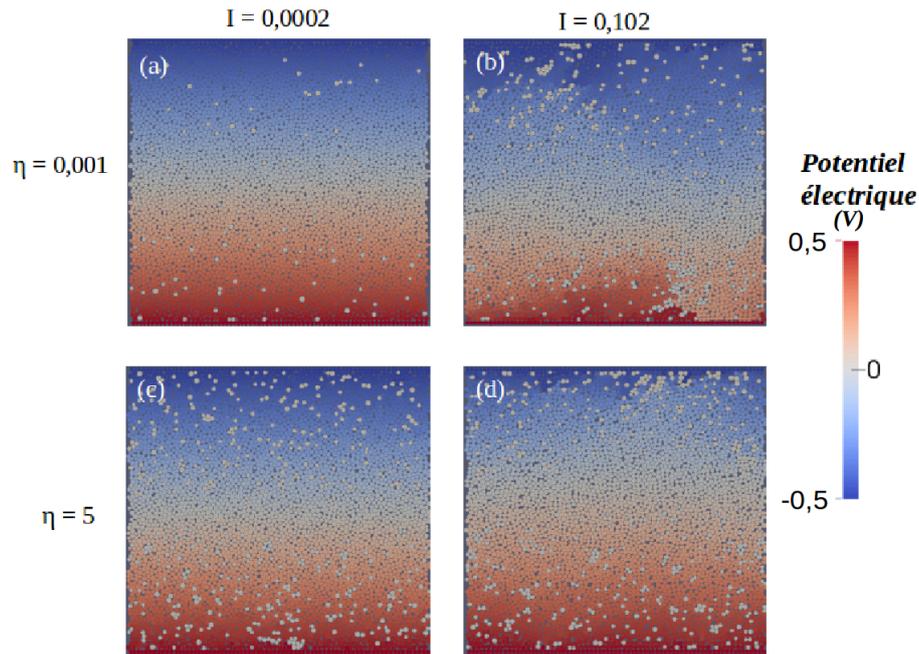


FIGURE 3.6 – Visualisation du potentiel électrique pour quatre configurations différentes :  $I$  égal à 0,0002 ((a), (c)) et 0,102 ((b), (d)) et  $\eta$  égal à 0,001 ((a), (b)) et 5 ((c), (d)).

passage de l'électricité. Bien que la cohésion ait un effet sur le potentiel électrique, l'effet du nombre inertiel reste plus important.

Cela se confirme avec l'évolution de la résistance suivant le nombre inertiel ainsi que l'intensité de cohésion observée en figure 3.7. La résistance évolue dans les mêmes tendances que les modèles issues de la littérature [RENO 08, ZENG 16(2)].

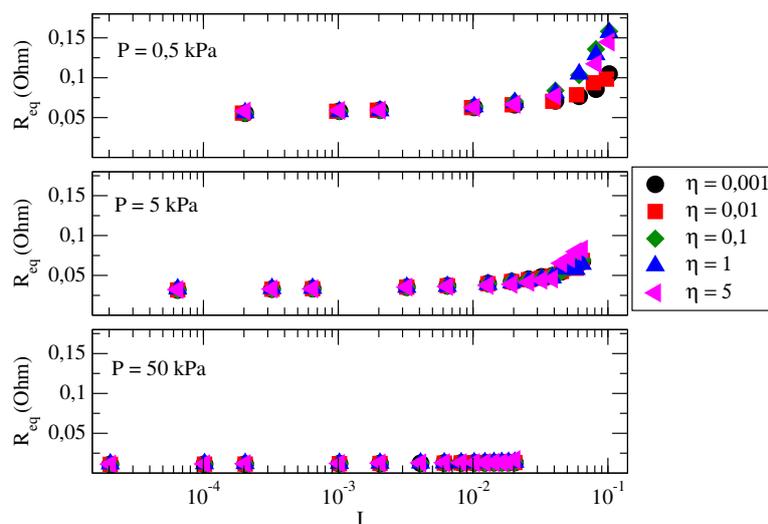


FIGURE 3.7 – Évolution de la résistance équivalente en fonction de  $I$  pour différents niveaux de cohésion et pour des vitesses allant de 0,01 à 10 m/s.

Lorsque la pression augmente, la résistance diminue tandis que lorsque la vitesse augmente, la résistance augmente. Plus spécifiquement, l'augmentation de  $I$  tend à rendre le milieu plus isolant. En effet, l'évolution de la résistance va dans le sens de celle de la porosité car l'augmentation de la porosité diminue le nombre de chaînes de forces, celles-ci étant les "chemins" de passages électriques. Quant aux effets cohésifs, ils n'influencent guère l'état électrique. En effet, comme décrit au cours du chapitre 2, le modèle de constriction de Holm est utilisé au cours de ces travaux, ce modèle reliant la résistance à la résistivité et à la surface de contact. Cette surface est définie par la formule proposée par Bowden & al. [BOWD 86]. La résistance équivalente est alors exprimée de la façon suivante :

$$R_{eq} = \frac{\rho_e \sqrt{\pi Y}}{2\sqrt{(F_n + \gamma)}} \quad (3.7)$$

Ainsi, la force de cohésion ( $\gamma$ ) qui est faible devant la force de contact ( $F_n$ ) n'influence pas la valeur de la résistance de façon significative.

### II.3 Énergie de cohésion

Pour finir, après l'analyse de l'impact de la force de cohésion  $\gamma$ , l'impact de l'énergie de cohésion  $E_{coh} = \gamma d_w$  (assimilable à l'énergie d'interaction de la loi de Van der Waals) est observée. En effet,  $E_{coh}$  est l'énergie nécessaire pour maintenir deux éléments en contact. D'un point de vue électrique, l'impact de l'énergie de cohésion s'est révélé être faible tandis que, d'un point de vue mécanique, il s'est révélé être plus important sur le coefficient de frottement.

Aussi, quatre valeurs de  $\gamma$  ont été utilisées qui, dans cette configuration, correspondent exactement à des valeurs de  $\eta$  de 0,25 ; 0,5 ; 0,75 et 1. Pour chacune de ces valeurs, une variation de la valeur de  $d_w$  est effectuée prenant comme valeur 5, 10, 15, 20 et 25 % du rayon moyen des particules. Le nombre inertiel est fixé à 0,03 (la pression à 5 kPa et la vitesse à 1 m/s). Les résultats sont représentés sur la figure 3.8.

Chaque point correspond à une simulation avec un couple de  $(\gamma, d_w)$  donné et chaque courbe est tracée en fonction d'une valeur de  $d_w$ . Dans le premier cas (a), les courbes sont tracées en fonction de l'énergie de cohésion et bien que proche les unes des autres, elles sont différenciées alors qu'il serait attendu des valeurs de  $\bar{\mu}$  identique pour chaque valeur d'énergie de cohésion. Dans le second cas (b), le produit  $\gamma\sqrt{d_w}$  induit une superposition des courbes. De ce fait, pour obtenir cette corrélation, il serait nécessaire d'apporter un terme correctif dans l'énergie de cohésion.  $a = d_w^{-1/2}$  peut être proposé comme terme correctif et l'énergie cohésive corrigée  $E_{coh}^*$  est alors donnée par :

$$E_{coh}^* = a\gamma d_w = \gamma d_w^{1/2} \quad (3.8)$$

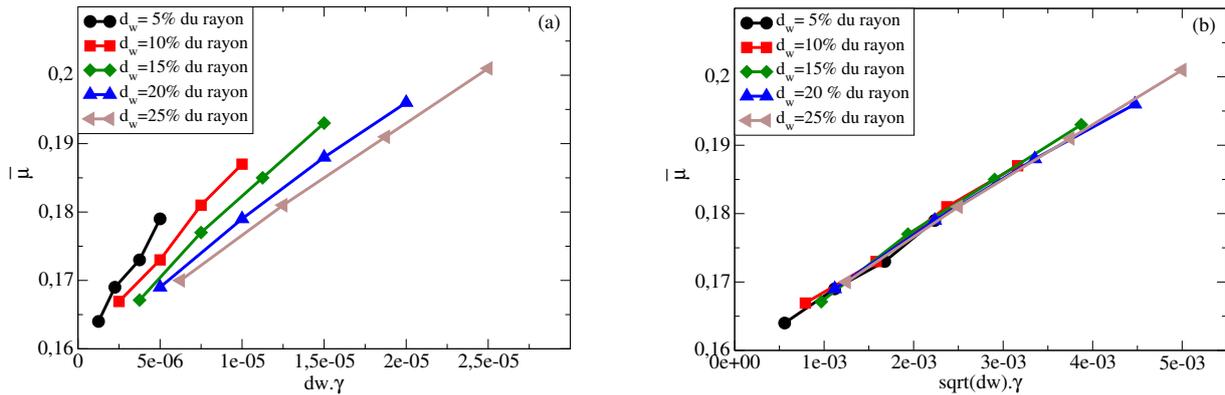


FIGURE 3.8 – Évolution du frottement global en fonction de : (a) l'énergie de cohésion  $\gamma d_w$  et de (b)  $\gamma \sqrt{d_w}$  pour différentes distances cohésives et pour un nombre I de 0,03.

Il est envisageable alors de relier l'état mécanique du système à l'énergie de cohésion nécessaire pour maintenir deux éléments en contact, ce qui permettrait de relier les effets globaux aux effets locaux.

Dans ses travaux, Rivière [RIVI 15(2)] avait également mis en évidence cette relation linéarisée avec ce terme correctif. Toutefois, ce terme correctif n'est pas entièrement satisfaisant. Afin que le terme énergétique soit homogène à une énergie, il serait nécessaire de comprendre les raisons pour lesquelles l'énergie seule est insuffisante. D'autres effets sont peut-être en œuvre au sein de l'interface pour expliquer les différences observées.

### III Troisième corps hétérogène

#### III.1 Complexification de l'interface

En vue de se rapprocher de la réalité d'un troisième corps issu de la semelle de frein, l'évolution des grandeurs précédentes ( $\bar{\mu}$ ,  $\phi/\phi^*$  et  $R_{eq}$ ) est observée en fonction de la constitution de l'interface vue comme un mélange cuivre/graphite (Cu/Gr) avec une proportion de chaque constituant pouvant aller de 0 à 100% (cf. fig. 3.9). Cette évolution est également observée pour différentes vitesses afin de vérifier l'influence de celles-ci sur le comportement du mélange au sein du troisième corps.

En plus du rajout d'une proportion de Cu ou de Gr, les propriétés propres aux interactions en présence seront modulées. Ainsi, au niveau local, la proportion de particules de cuivre Cu% varie de 0 à 100%. Plusieurs valeurs de frottement  $\mu$  et de cohésion  $\gamma$  liés à l'interaction Cu/Gr sont proposées. Cette interaction est la plus intéressante à analyser car la modification des paramètres locaux de l'interaction Cu/Gr (qui ne sont pas connus) permet d'analyser le comportement global de la mixture suivant les paramètres locaux entre ses constituants. En effet, la littérature fournit des données empiriques sur

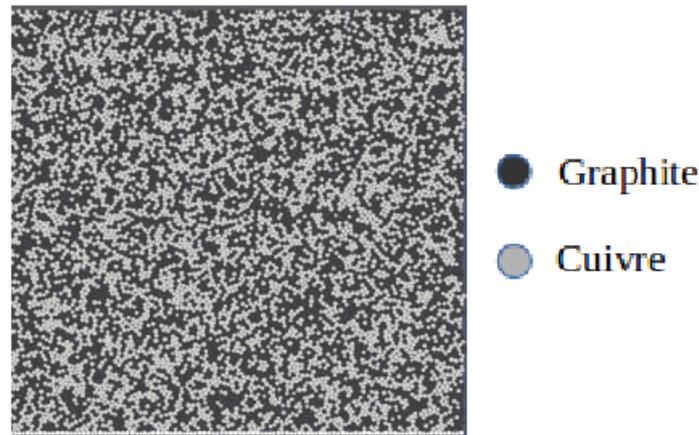


FIGURE 3.9 – Représentation numérique par DEM d'une mixture cuivre/graphite (50% Cu, 50% Gr).

le graphite et le cuivre ne permettant que d'approcher les valeurs locales des interactions Cu/Cu et Gr/Gr.

### III.2 Impact du frottement local

Pour commencer cette analyse, seul le frottement local intervient. Les paramètres d'interactions entre particules sont listés dans le tableau 3.2 pour des frottements Cu/Cu et Gr/Gr à, respectivement, 0,6 et 0,05. En parallèle, la vitesse est quant à elle fixée à 0,2 ; 2 et 20 m/s. Quant au frottement Cu/Gr, il prend pour valeur 0 ; 0,05 et 0,15.

Interactions	graphite/graphite	cuivre/cuivre	cuivre/graphite
Frottement local $\mu$	0,05	0,6	0 ; 0,05 ; 0,15

Tableau 3.2 – Paramètres de frottement local

L'augmentation de cuivre dans l'échantillon affecte son comportement tribologique car le frottement global augmente de 0,17 à 0,3 (cf. fig. 3.10). Un point intéressant à noter est l'impact du frottement Cu/Gr sur une telle évolution.

Si pour la plus grande valeur, l'augmentation de frottement est linéaire ; pour la plus petite valeur, le frottement diminue et présente une valeur minimale pour environ 40 % de Cu dans l'échantillon (pour les trois vitesses). Ensuite, le frottement augmente rapidement pour atteindre la valeur maximale de frottement (0,3 pour 100 % de Cu). Un tel résultat laisse supposer l'existence d'une proportion critique de Cu pour minimiser simultanément le frottement et la résistance électrique. Si la vitesse augmente les valeurs du coefficient de frottement macroscopique [SU 15], la sensibilité due à celle-ci est plus importante dans le cas où le frottement local entre graphite et cuivre a une valeur nulle.

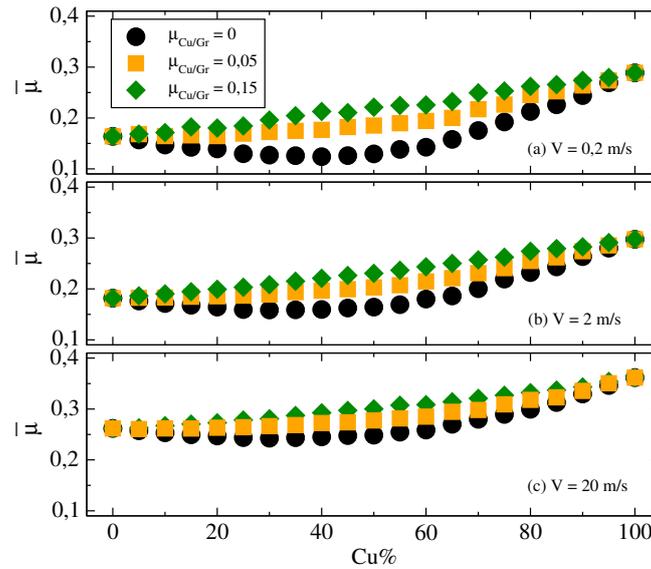


FIGURE 3.10 – Évolution du frottement global pour différents frottements Cu/Gr (0 ; 0,05 et 0,15) et pour (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s.

Ces résultats reflètent certaines observations expérimentales réalisées par Su & al. [SU 15, SU 17] où le mélange Cu/Gr est analysé pour différentes proportions de chacun des constituants : les auteurs présentent les résultats en soulignant l'importance de l'interaction Cu/Gr sur le comportement global de l'échantillon (cf. fig. 3.11). En effet, leurs résultats illustrent l'évolution du frottement pour différentes proportions cuivre/graphite.

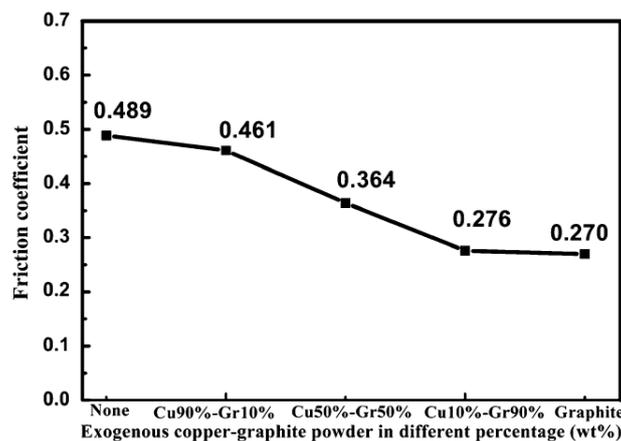


FIGURE 3.11 – Évolution du coefficient de frottement pour une mixture composé principalement de cuivre et de graphite d'après Su & al. [SU 15].

Concernant l'évolution du rapport  $\phi/\phi^*$  (cf. fig. 3.12) celui-ci est indépendant de la valeur de frottement Cu/Gr et est quasi constante pour une vitesse égale à 0,2 m/s. Pour la valeur la plus élevée (c'est-à-dire 20 m/s), on peut observer une forte augmentation de la porosité pour la mixture composée de plus de 50% de cuivre.

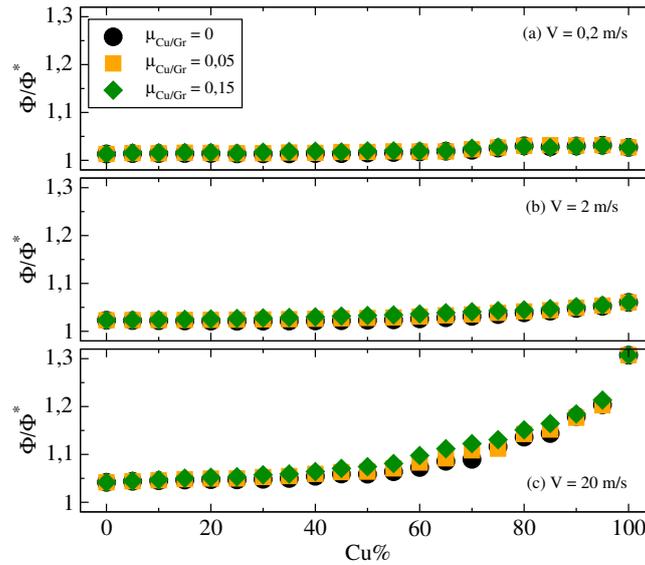


FIGURE 3.12 – Évolution de la porosité pour différents frottements Cu/Gr (0 ; 0,05 et 0,15) et pour (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s.

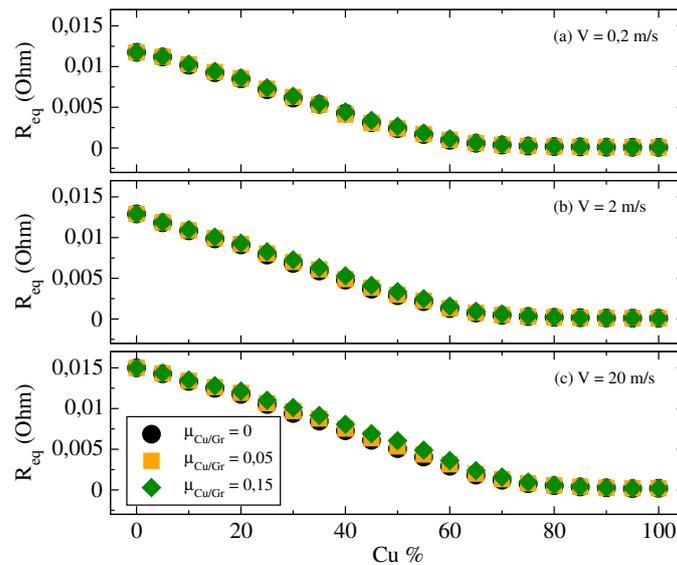


FIGURE 3.13 – Évolution de la résistance électrique globale pour différents frottements Cu/Gr (0 ; 0,5 et 0.15) et pour (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s.

Pour les aspects électriques, la résistance équivalente diminue naturellement avec la proportion de cuivre (cf. fig. 3.13), de près de 0,015 ohm (pour 0% de Cu) à une valeur proche de 0 (pour 100% de Cu) et est indépendante de la valeur du frottement Cu/Gr. Cela est dû à la différence de conductivité du graphite et du cuivre, la seconde étant supérieure à la première. La diminution est décomposée en deux parties : une partie linéaire jusqu'à un pourcentage de cuivre qui semble dépendre de la vitesse de cisaillement (jusqu'à 60% pour 0,2 m/s et 80% pour 20 m/s) et une partie constante où les variations de  $R_{eq}$  sont non significatives. Comme la première partie est linéaire, il est possible de remarquer que

la vitesse affecte non seulement le point de transition, mais toutes les valeurs de  $R_{eq}$ . De plus, la diminution de la résistance électrique globale n'est pas liée à l'évolution de la variation de porosité.

### III.3 Impact de la cohésion locale

Si le frottement local est un paramètre important, il n'est pas du premier ordre lorsque le frottement global de la mixture est étudié : la cohésion locale a une influence plus importante que le frottement local. Pour ces raisons, le cas cohésif sans frottement est également analysé. Plus précisément, les cohésions Cu/Cu et Gr/Gr sont fixées respectivement à 10 et 0,01 N pour respecter le rapport entre les données de la littérature [SU 15, SU 15(2)]. Comme pour les analyses précédentes, la vitesse prend les valeurs 0,2; 2 et 20 m/s. La cohésion Cu/Gr est donnée pour 1, 10 et 50 N, ce qui correspond à des valeurs de  $\eta$  de, respectivement, 0,1; 1 et 5. Ces données sont répertoriées dans le tableau 3.3.

Interactions	graphite/graphite	cuivre/cuivre	cuivre/graphite
Cohésion locale $\gamma$	0,01 N	10 N	1, 10, 50 N
Indice de cohésion $\eta$	0,001	1	0,1; 1; 5

Tableau 3.3 – Paramètres de cohésion locale

La cohésion et la vitesse de cisaillement ont un rôle important sur l'évolution de  $\bar{\mu}$  (cf fig. 3.14).

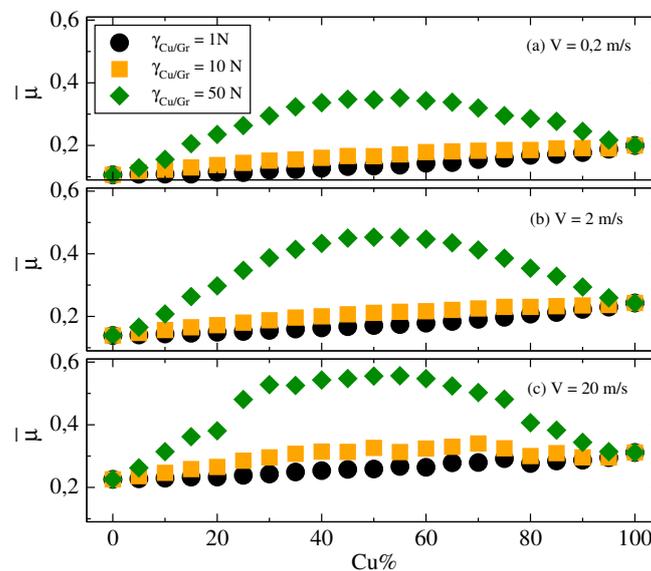


FIGURE 3.14 – Évolution du frottement global pour différentes cohésions Cu/Gr (1, 10 et 50 N) et pour (a) 0.2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s.

Pour les plus petites valeurs de vitesse de cisaillement (0,2 et 2 m/s) et de cohésion Cu/Gr (1 et 10 N),  $\bar{\mu}$  augmente avec l'augmentation de la proportion de cuivre. Plus la cohésion et la vitesse sont élevées, plus le frottement est élevé. Pour une valeur de

cohésion de 50 N, l'évolution de  $\bar{\mu}$  présente une valeur maximale à 50% de cuivre, qui augmente également avec la vitesse. Pour la plus haute vitesse, cette tendance se combine à un plateau, allant de 30% à 70% de cuivre.

Pour les plus petites vitesses (0,2 et 2 m/s), la variation maximale de porosité (cf. fig. 3.15) est située à 50% du cuivre (cas où le nombre d'interactions Cu/Gr est le plus élevée), l'évolution de la porosité globale est quasi symétrique.

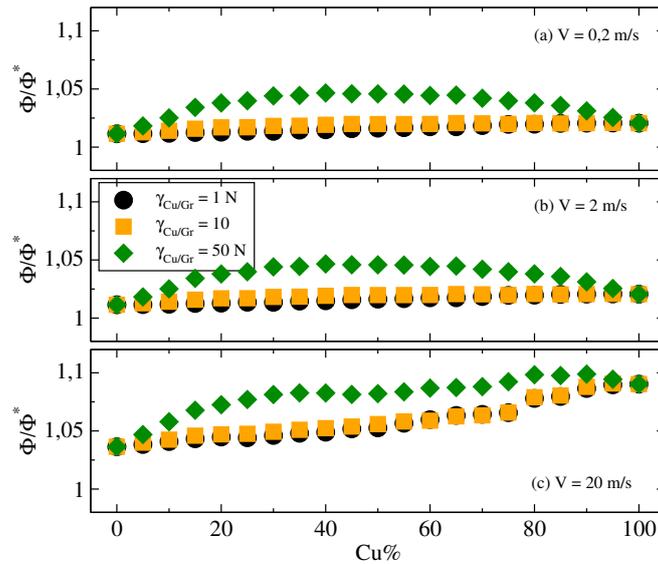


FIGURE 3.15 – Évolution de la porosité pour différentes valeurs de cohésions Cu/Gr (1, 10 et 50 N) et pour (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s.

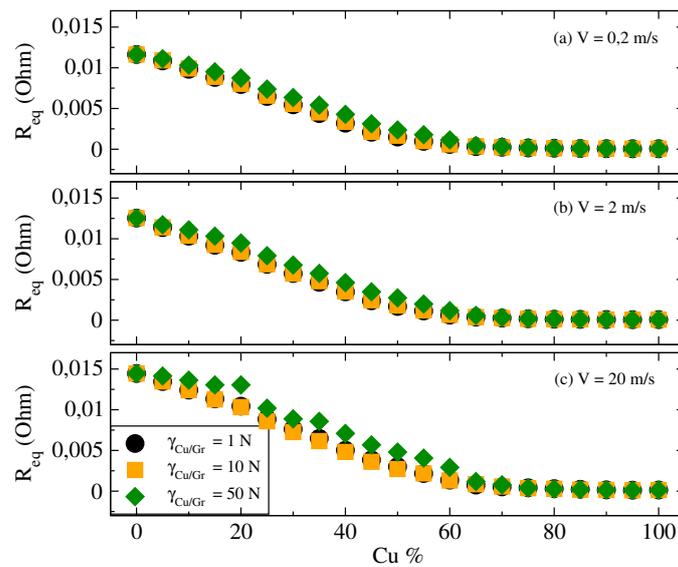


FIGURE 3.16 – Évolution de la résistance électrique globale pour différentes cohésions Cu/Gr (1, 10 et 50 N) et pour (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s.

Pour la valeur la plus élevée de  $V$  (c'est-à-dire 20 m/s), le résultat n'est pas le même. Comme pour  $\bar{\mu}$ , une vitesse élevée exacerbe la différence entre les propriétés locales : une augmentation quasi linéaire de  $\phi/\phi^*$  est observée pour la cohésion Cu/Gr égale à 1 et 10 N. Pour la valeur de cohésion supérieure,  $\phi/\phi^*$  augmente plus rapidement avec la proportion de cuivre puis sature en raison de l'exacerbation de la propriété locale de cuivre (vitesse élevée).

En ce qui concerne l'évolution de la résistance (cf. fig. 3.16), la tendance des courbes (comme la différence entre les courbes) est la même que pour le cas avec frottement local : une diminution linéaire et un plateau avec une transition proche de 60% de cuivre. La différence principale est observée pour la vitesse la plus élevée et une valeur de cohésion élevée pour laquelle des variations de résistance se produisent pendant la partie où  $R_{eq}$  décroît linéairement.

### III.4 Frottement local VS cohésion locale

Pour clore ces analyses locales concernant les mixtures Cu/Gr, des simulations ont été réalisées en tenant compte à la fois du frottement local et de la cohésion locale. Les paramètres d'interactions entre particules sont listés dans le tableau 3.4. Ces simulations ont été effectuées pour une vitesse de 2 m/s, vitesse de cisaillement pour laquelle les grandeurs globales ne sont pas exacerbées par les valeurs locales. Ainsi, l'observation dépendra seulement de la compétition entre frottement et cohésion.

Interactions	graphite/graphite	cuivre/cuivre	cuivre/graphite
Frottement local	0,05	0,6	0 ; 0,05 ; 0,15
Cohésion locale	0,01 N	10 N	0 ; 1 ; 10 N

Tableau 3.4 – Paramètres locaux

L'évolution du frottement global pour différents frottements Cu/Gr et différentes valeurs de cohésion locales sont présentées en figure 3.17. Les propriétés locales ont plus d'impact sur le frottement global que sur la porosité (cf. fig. 3.18) ou la résistance électrique (cf. fig. 3.19).

$\bar{\mu}$  augmente naturellement avec l'augmentation du pourcentage de cuivre. Lorsque le frottement Cu/Gr est le plus élevé,  $\bar{\mu}$  augmente plus vite. Quand la cohésion Cu/Gr augmente (dans les intervalles considérées), l'évolution du frottement global est affectée en particulier pour une valeur de frottement local élevée. Quand la cohésion est égale à 0 ou 1 N, la tendance générale de  $\bar{\mu}$  est la même. Mais pour une cohésion plus élevée (c'est-à-dire 10 N), la courbure de  $\bar{\mu}$  change entre les trois valeurs de frottement local.

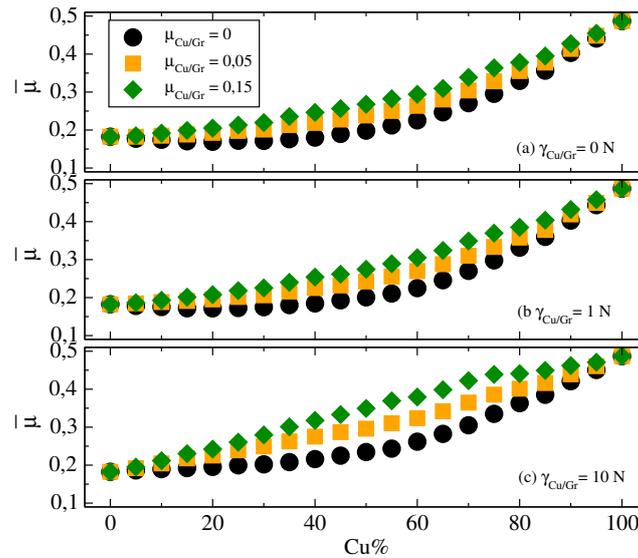


FIGURE 3.17 – Évolution du frottement global pour différents frottements Cu/Gr (0, 0,05 et 0,15) et pour (a)  $\gamma_{Cu/Gr} = 0$  N, (b)  $\gamma_{Cu/Gr} = 1$  N, (c)  $\gamma_{Cu/Gr} = 10$  N.

L'effet est un peu plus élevé sur l'évolution de la porosité comme présenté sur la figure 3.18. Puisque la cohésion locale et le frottement local sont plus élevés pour le cuivre que pour le graphite, la porosité augmente naturellement avec l'augmentation du pourcentage de cuivre. Pour 50% de cuivre, la différence entre les différentes valeurs de frottement augmente avec l'augmentation de la cohésion.

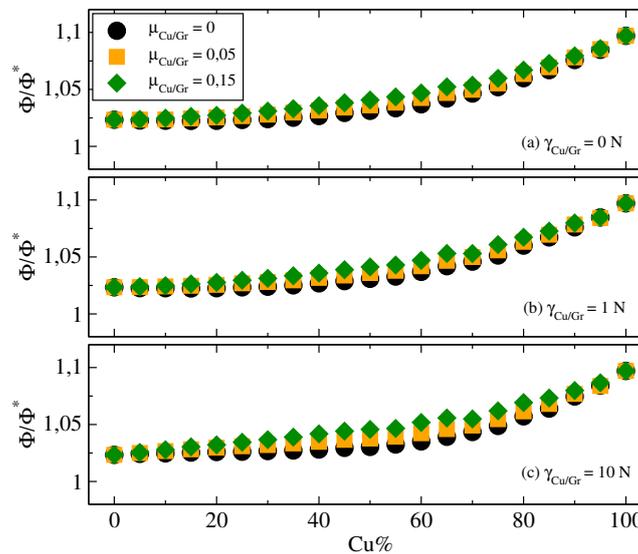


FIGURE 3.18 – Évolution de la porosité pour différents frottements Cu/Gr (0, 0,05 et 0,15) et pour (a)  $\gamma_{Cu/Gr} = 0$  N, (b)  $\gamma_{Cu/Gr} = 1$  N, (c)  $\gamma_{Cu/Gr} = 10$  N.

La figure 3.19 montre l'évolution de la résistance électrique pour les différents couples friction - cohésion. Comme observé précédemment, la résistance diminue avec la proportion de cuivre, de près de 0,015 ohm (pour 0% de Cu) à une valeur proche de 0 (pour 100%

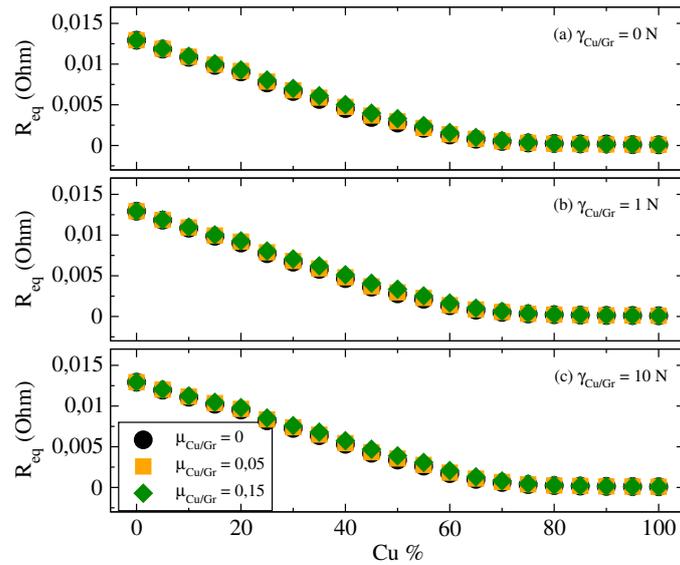


FIGURE 3.19 – Évolution de la résistance électrique globale pour différents frottements Cu/Gr (0, 0,05 et 0.15) et pour (a)  $\gamma_{Cu/Gr} = 0$  N, (b)  $\gamma_{Cu/Gr} = 1$  N, (c)  $\gamma_{Cu/Gr} = 10$  N.

de Cu) et est indépendante de la valeur du frottement Cu/Gr. Dans la gamme des valeurs considérées, les différences sont négligeables, ainsi, les propriétés locales n'affectent pas les mesures électriques macroscopiques.

### III.5 Influence sur la microstructure

Tous les résultats précédents sont directement corrélés aux propriétés du matériau et pas aux changements de la microstructure du milieu.

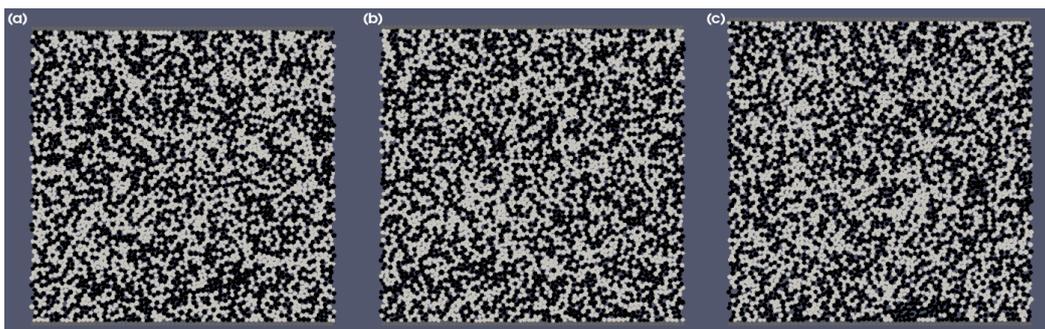


FIGURE 3.20 – Visualisation des états finaux obtenus avec des échantillons composés de 50% de cuivre (en gris) et 50% de graphite (en noir) pour différentes vitesse de cisaillement : (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s.

Comme illustré par la figure 3.20, qui représente des visualisations instantanées de l'état final obtenu avec des échantillons composé de 50% de cuivre pour différentes vitesses de cisaillement, la vitesse de cisaillement n'affecte pas la distribution des particules. Cette observation est valable pour les différents cas étudiés précédemment (simulations

cohésives sans frottement, avec frottement et simulations avec frottement uniquement). S'il y a quelques réarrangements dans la microstructure, les propriétés globales ne sont pas affectées.

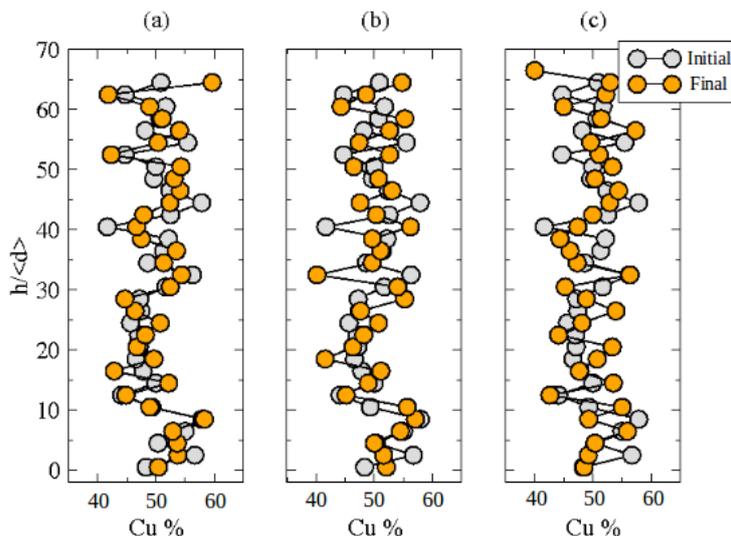


FIGURE 3.21 – Comparaison entre état initial et final du profil de densité de cuivre dans l'épaisseur de l'échantillon (normalisé par le diamètre moyen) pour différentes vitesses de cisaillement : (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s.

La figure 3.21, en appui de la figure 3.20, illustre l'absence de variations remarquables entre les états initiaux et finaux (sur celle-ci, les profils de densité de cuivre ont une épaisseur d'échantillon normalisée par le diamètre moyen).

### III.6 Discussion sur le comportement mécano-électrique d'un troisième corps cuivre/graphite

A partir des mesures précédentes, plusieurs observations peuvent être faites quant au comportement mécano-électrique d'un troisième corps constitué de cuivre et de graphite..

Premièrement, selon la composition du mélange, le frottement global augmente entre un milieu de graphite pur et un milieu de cuivre pur. Cette évolution est sensible aux valeurs des interactions entre cuivre et graphite. Lorsque ces valeurs sont nulles, l'évolution du frottement diminue jusqu'à une valeur de 40% de cuivre puis augmente. Un tel comportement disparaît avec une augmentation de la cohésion locale mais aussi avec une augmentation du cisaillement.

Deuxièmement, en termes de porosité, le cisaillement exacerbe la différence des propriétés locales du milieu. Si pour un faible cisaillement, l'évolution de la porosité semble indépendante du pourcentage de cuivre, ce n'est pas le cas pour un cisaillement élevé.

Troisièmement, la résistance électrique globale ne dépend pas des propriétés locales du troisième corps mais de sa composition. Les évolutions qui pourraient intervenir à l'intérieur d'une couche de troisième corps semblent du second ordre selon les propriétés électriques des différents constituants du mélange. De plus, il semble important de noter que le cisaillement affecte la transition entre la décroissance linéaire et le plateau observé.

Enfin, en l'absence de cohésion (milieu pulvérulent), le frottement global présente une forme de cloche avec une valeur maximale. la valeur maximale se produit près des mélanges de 50% Cu/50% Gr. Lorsque la cohésion est présente (avec ou sans frottement), le comportement précédent disparaît. Le comportement obtenu est corrélé à celui observé dans la littérature [SU 15]. En effet, la fonction qui correspond aux résultats s'apparente à une fonction puissance [SU 15]. Selon les valeurs de cohésion et de frottement locaux, l'évolution du frottement global est décrite par :

$$\bar{\mu} = \mu_* + \alpha x^\beta \quad (3.9)$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont deux paramètres dépendant des propriétés de l'échantillon. Dans une première analyse, il semble que  $\alpha$  augmente et que  $\beta$  diminue lorsque la cohésion locale et le frottement local augmentent (par exemple,  $(\alpha, \beta) = (7 \times 10^{-8}; 3, 3)$  quand  $\mu = 0$  et  $\gamma = 0$  N et  $(\alpha, \beta) = (6 \times 10^{-3}; 0, 86)$  quand  $\mu = 0, 15$  et  $\gamma = 10$  N). Une étude paramétrique plus complète pourra être faite pour ajuster  $\alpha$  et  $\beta$  avec les paramètres locaux.

Pour compléter la discussion, les résultats précédents peuvent également être comparés aux résultats expérimentaux de la littérature. La figure 3.22 compare l'évolution du frottement global en fonction de la vitesse obtenue dans la section III.4 et les travaux de Su & al. [SU 15], Kovacik & al [KOVA 08].

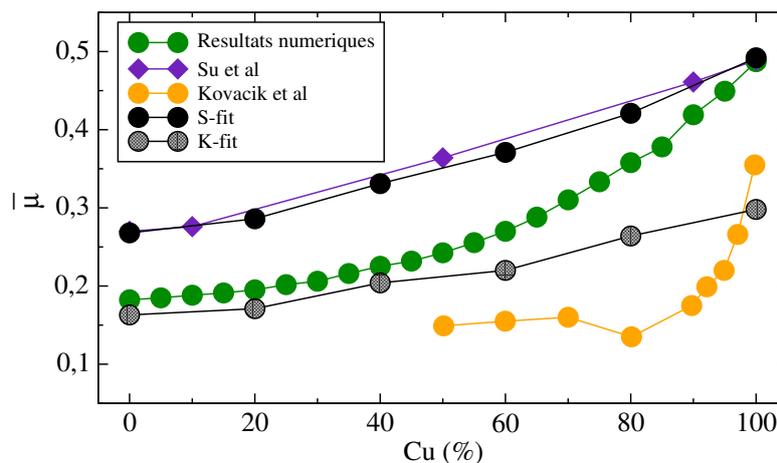


FIGURE 3.22 – Évolution du frottement global pour résultats numériques et expérimentaux.

L'observation n'est pas surprenante car les essais expérimentaux sont menés sur différents type de mixture de troisième corps. Su & al. [SU 15] étudient l'ajout de poudre de Cu/Gr entre un composite Cu/Gr (60% de cuivre et 15% de graphite ainsi que d'autres constituants) et un disque tournant tandis que Kovacik & al. [KOVA 08] s'intéressent directement aux composites Cu/Gr avec une composition différente. Ainsi, les simulations actuelles sont plus représentatives des premiers travaux expérimentaux (sur la poudre) que des seconds (sur le composite). De ce fait, même si dans les différents cas, le frottement global augmente avec la proportion de cuivre, les valeurs quantitatives ne sont pas les mêmes.

Pour essayer de faire correspondre les résultats expérimentaux obtenus par Su & al. [SU 15], une nouvelle campagne de simulations a été effectuée (cf. S-fit sur la figure 3.22), montrant une correspondance parfaite entre les résultats expérimentaux et numériques. Bien que les matériaux soient différents, les conditions limites concernant les expérimentation de Kovacik sont appliquées sur cette nouvelle campagne numérique et les résultats sont représentés sur la figure 3.22 en tant que K-fit. De toute évidence, il n'y a pas de correspondance entre les résultats expérimentaux et numériques, dans ce cas, les systèmes expérimentaux et numériques sont différents. Dans les deux cas, les valeurs de frottement global minimales et maximales sont très proches, et le frottement présente une augmentation avec le pourcentage de cuivre dans le système. De plus, les résultats expérimentaux présentent un plateau pour des valeurs inférieures à 80% de cuivre. Par conséquent, la couche du troisième corps générée expérimentalement est probablement composée avec un pourcentage plus élevé de graphite et souligne le fait que la couche du troisième corps peut avoir un comportement et une constitution totalement différents de celui des premiers corps.

Ces analyses, portant sur le comportement d'un troisième corps cuivre/graphite, ont permis de réaliser une publication scientifique [CHAP 18].

## **IV Synthèse sur l'influence des matériaux de freinage au sein du troisième corps**

Ces investigations ont permis de dégager des tendances intéressantes sur l'évolution d'un troisième corps. Celles-ci ont essentiellement permis de mettre en évidence des comportements mécano-électriques favorables à un shuntage satisfaisant en présence de particules de semelles de frein (cf. fig. 3.23).

Ce schéma de synthèse peut paraître difficile à lire, c'est pourquoi une explication est donnée. La première ligne situe les paramètres locaux : frottement et cohésion. La seconde ligne fait apparaître les facteurs pouvant influencer les grandeurs mesurées :

- pour le cas du frottement local : le nombre inertiel (ou la vitesse), les modifications de frottement local et de proportion de cuivre dans l'interface,
- pour le cas de la cohésion locale : le nombre inertiel (ou la vitesse), les modifications de cohésion locale et de proportion de cuivre dans l'interface,
- pour le cas frottement local + cohésion locale : les modifications de frottement local, de cohésion locale et de proportion de cuivre dans l'interface.

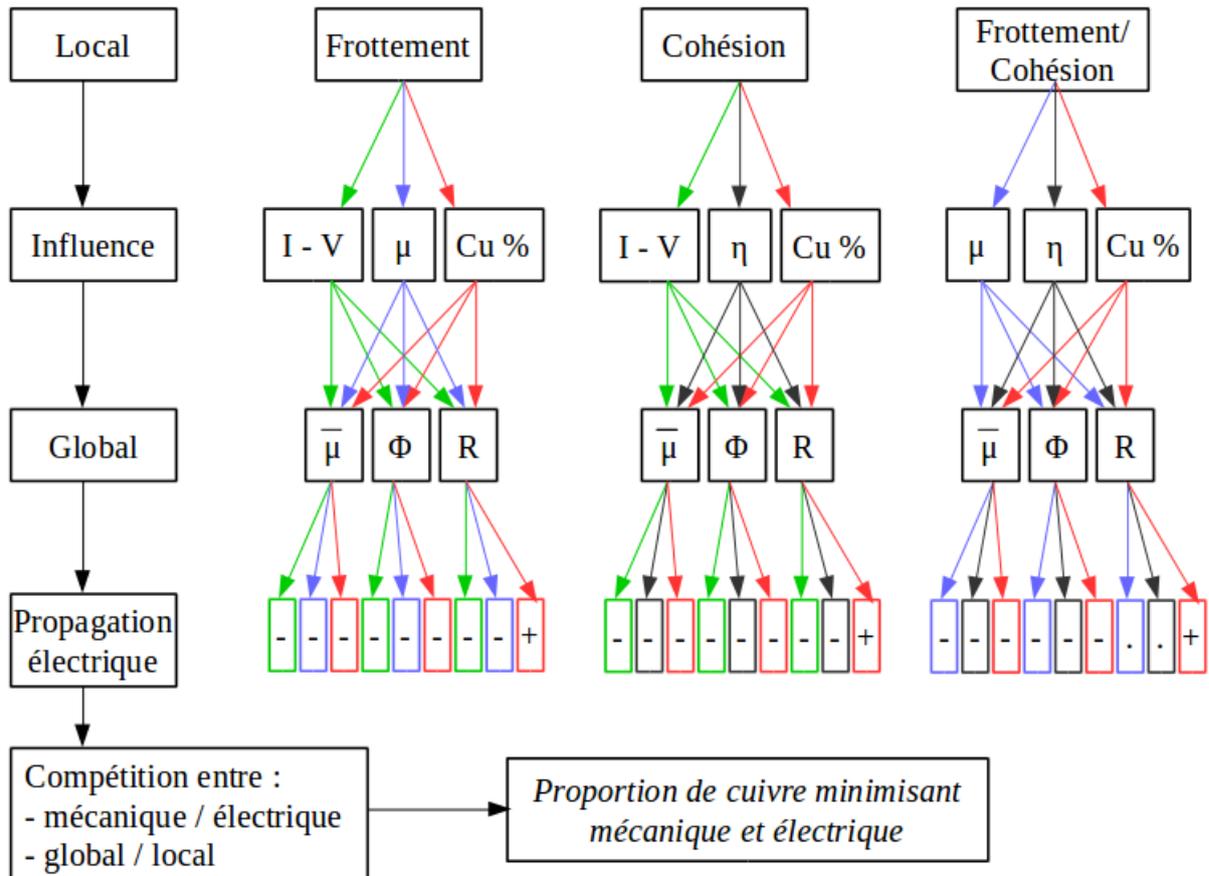


FIGURE 3.23 – Conditions favorables au shuntage.

En troisième ligne sont données les grandeurs globales mesurées, frottement, porosité, résistance équivalente. La quatrième ligne correspond alors à la bonne (+) ou à la mauvaise (-) faisabilité de conduction électrique au sein du troisième corps pour chacun des cas locaux analysés, suivant les critères d'influence et les grandeurs globales impactées. Au cœur de ce schéma, les flèches vertes, bleues, noires et rouges correspondent respectivement aux impacts du nombre inertiel, du frottement local, de la cohésion locale et de la proportion de cuivre. La présence de nombreux facteurs d'influences sur les grandeurs globales ne sont pas favorables à une bonne conduction électrique au sein du troisième corps (signe -). Seule une proportion importante de cuivre s'avère favorable (faible résistance électrique) à une bonne conduction (signe +).

Ainsi, l'un des principaux points de ces analyses est la compétition entre les grandeurs globales (mécanique et électrique) pour une conduction électrique adéquat. Mais il y a également une compétition entre grandeurs locales (frottement et cohésion) visant à influencer le comportement global. De même qu'il y a une compétition global/local car la proportion de constituants (local) influence la compétition entre les grandeurs globales.

Après avoir vu, au cours de ce chapitre, la rhéologie du troisième corps issue de l'usure des semelles de frein et associée au phénomène de shuntage, un aspect portant sur la dégradation des matériaux de freinage sera abordé au cours du chapitre suivant. Cela permettra, en termes de circuit tribologique, d'introduire le débit source.



# Chapitre 4

## Analyse de la dégradation de matériaux de freinage

### I Introduction

#### I.1 Philosophie générale

Dans le chapitre précédent, l'évolution dynamique du troisième corps a été analysé d'un point de vue multi-physique. Parmi les différentes hypothèses utilisées, celles considérant que cette interface mobile est déjà présente dans le contact est très forte. En effet, si le troisième corps peut-être présent dans le contact de manière artificielle, il est plus communément issu des corps en contact et donc, né de leur dégradation. Ainsi, c'est ce mécanisme que l'on souhaite mettre en place ici, en ajoutant au débit interne, la notion de débit source (cf. fig. 4.1).

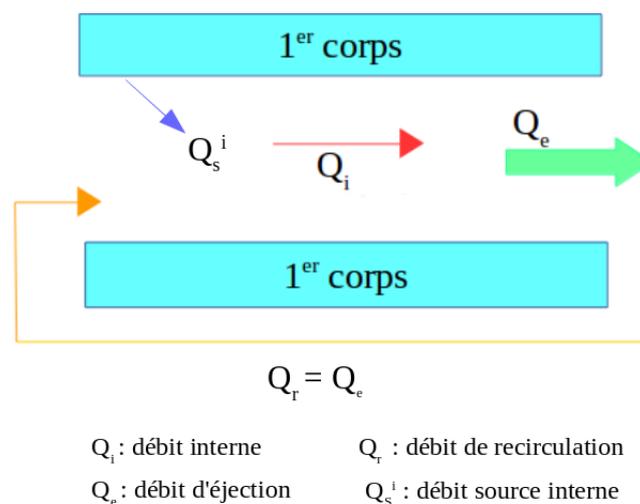


FIGURE 4.1 – Débits de matière représentés au cours de ce chapitre.

Comme pour le chapitre précédent, la dégradation des matériaux de freinage va faire l'objet d'une analyse locale. Toutefois, celle-ci se fera ici dans le cadre d'un modèle mécano-thermique. L'objectif est de comprendre l'impact des paramètres locaux sur les mesures globales (telle que la dégradation et l'aspect thermique qui en découle). Au cours de ce chapitre, le matériau de freinage est modélisé de différentes façons. Dans les différentes situations, le modèle numérique est assimilable à un contact disque-garniture ou roue-semelle (cf. fig. 4.2).

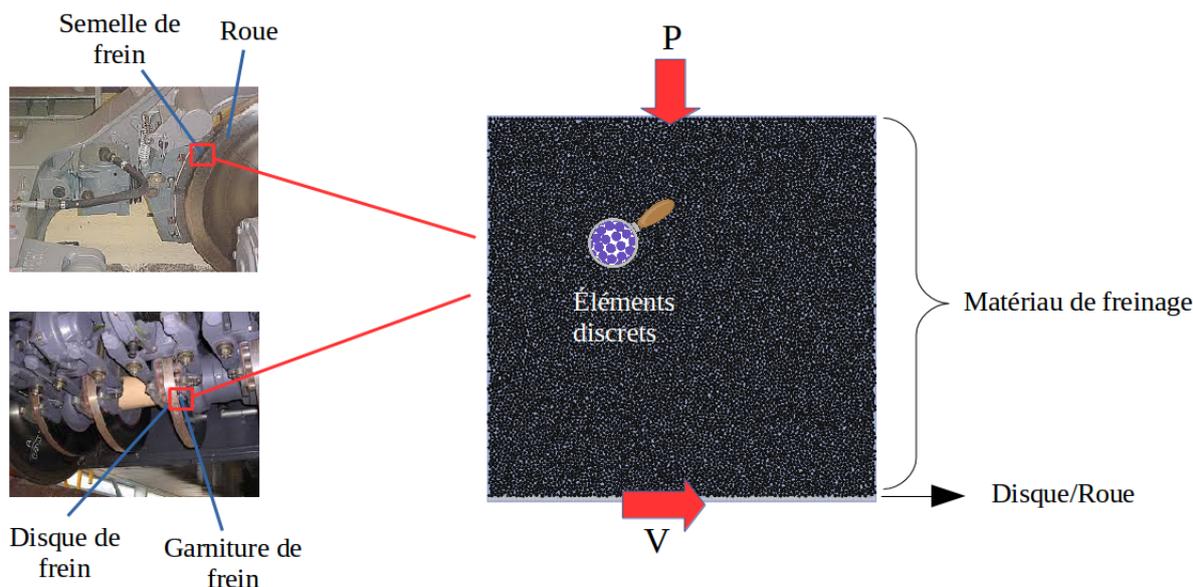


FIGURE 4.2 – Du volume réel au volume numérique.

Pour mener à bien les travaux numériques sur les matériaux de freinage, la méthodologie consiste à passer d'abord d'un volume réel à un volume numérique puis, ensuite, de chercher le volume élémentaire (VE) permettant de retrouver les propriétés globales du matériau. Il est représenté par un ensemble d'éléments en interaction suivant une loi type CZM. Ces éléments peuvent se détacher sous l'effet des sollicitations et conduire ainsi à l'apparition d'un troisième corps. Considérant que la dégradation du disque est négligeable en comparaison de celle du matériau de freinage, celui-ci est modélisé par une paroi non dégradable. En termes de sollicitations, une pression est appliquée sur la paroi supérieure (pression appliquée sur le matériau lors du freinage) et une vitesse de cisaillement est appliquée sur la paroi inférieure (résultante de la vitesse du train).

Afin de créer numériquement ce VE, il est nécessaire de définir les dimensions des particules numériques qui le constitue (plus petits éléments de discrétisation non dégradables) ainsi que des dimensions du VE lui-même. Ces dimensions dépendent du matériau réel sur lequel est basé le volume numérique.

Ce volume élémentaire est appréhendé dans un premier temps comme un matériau homogène, puis bi-phasique et enfin des techniques d'imageries sont utilisées pour numériser une plaquette de frein.

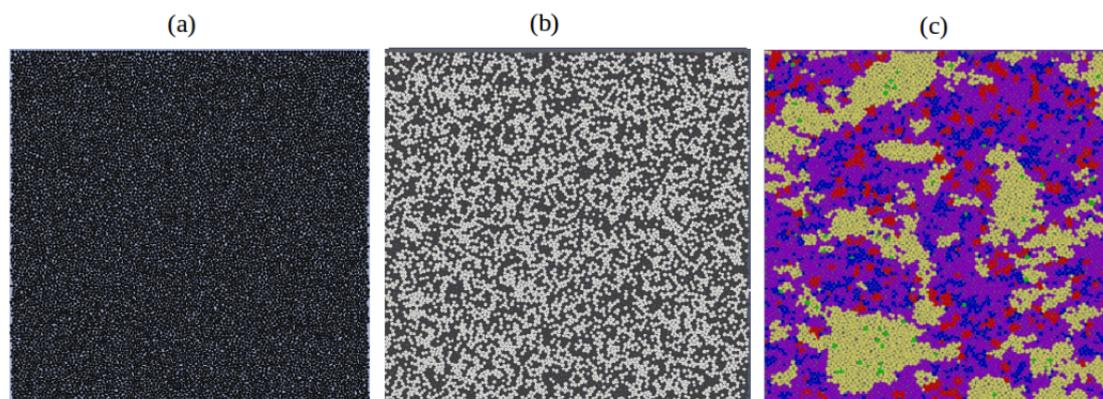


FIGURE 4.3 – Échantillons numériques (a) homogène, (b) bi-constituants, (c) G36S.

D'abord, l'intérêt est porté sur un modèle homogène constitué uniquement de graphite (et assimilable à l'interface constituée de graphite du chapitre précédent) (cf. fig. 4.3 (a)). Ceci permet l'analyse d'un cas modèle permettant de comprendre le comportement d'un matériau homogène. Ensuite, un échantillon composé de deux constituants distribués aléatoirement est analysé (cf. fig. 4.3 (b)). Ce type de modèle, constitué de graphite et de matrice métallique<sup>1</sup>, en diverse proportion, permet d'analyser le comportement du matériau suivant la proportion de chacun des constituants. Cela s'avère plus aisé avec deux constituants seulement pour discriminer l'influence de chacun suivant sa proportion. Enfin, le modèle basé sur une garniture réelle (G36S) est analysé (composé, entre autres, de matrice métallique, de céramique et de deux formes de graphite) (cf. fig. 4.3 (c)). Cet échantillon dont les particules sont disposées de façon similaire aux constituants de la garniture, permet de comprendre le rôle des constituants dans l'évolution de celle-ci. Plus de détails sur l'élaboration de cet échantillon seront données ultérieurement au cours de ce chapitre.

Les constituants des échantillons présentés sont liés par des lois d'interaction dont les paramètres déterminent les propriétés mécaniques de l'interaction. Les paramètres de ces interactions (rigidité  $C_n$  et énergie de décohésion  $\omega$ )<sup>2</sup> sont reportés dans différents tableaux dans les différentes sections qui suivent.

1. La matrice métallique est l'un des principaux constituants des garnitures de frein en matériaux frittés. Elle est composée principalement de cuivre et de fer.

2. La rigidité est déterminée à partir du module d'Young du constituant réel (cf. chapitre 2). Des énergies de décohésion différentes sont données afin de modéliser des interactions plus fragiles que d'autres.

## I.2 Endommagements local et global

De la même façon que dans le chapitre précédent, des grandeurs globales sont mesurées au cours de ces analyses numériques afin d'évaluer la réponse des modèles utilisés aux différentes sollicitations. Dans la suite, les grandeurs mesurées seront d'ordre mécanique (frottement global  $\bar{\mu}$ , endommagement moyen  $\bar{\beta}$ ) mais aussi d'ordre thermique (température  $T$ ). Certaines valeurs sont définies dans les chapitres précédents et les autres sont définies par la suite à commencer par l'endommagement moyen  $\bar{\beta}$ .

Afin de déterminer l'état d'intégrité moyen pour chaque élément numérique, une variable  $\beta_i$  est définie comme étant l'intensité moyenne d'endommagement des interactions portant sur chaque particule. Ainsi en prenant en compte la liste des interactions de la particule  $i$  au temps  $t_0$ , on peut écrire :

$$\beta_i = \frac{1}{n_i^0} \sum_{\alpha \in \mathcal{L}_i^0} \beta_\alpha \quad (4.1)$$

où  $n_i^0$  désigne le nombre initial de contact impliquant la particule  $i$  et  $\mathcal{L}_i^0$  la liste des contacts en lien avec la particule  $i$  au temps  $t_0$ . En complément de ce qui précède, on peut également définir  $\bar{\beta}$  qui définit l'état moyen d'intégrité du milieu.

$$\bar{\beta} = \frac{1}{n^0} \sum_{\alpha=1}^{n^0} \beta_\alpha \quad (4.2)$$

avec  $n^0$  le nombre d'interactions dans l'échantillon au temps  $t_0$ .

Enfin, afin d'analyser la dégradation globale du VE, le paramètre  $\omega$  est utilisé. C'est le paramètre conjugué de  $\bar{\beta}$ , ce dernier permet de rendre compte de l'état mécanique du système.

$$\omega = 1 - \bar{\beta}. \quad (4.3)$$

$\omega$  possède donc une valeur comprise entre 0 et 1, 0 pour un matériau sain et 1 pour un matériau complètement endommagé.

## II Échantillon homogène

Le premier cas d'étude est un modèle homogène constitué uniquement de graphite (cf. Tableau 4.1).

Interactions	$C_n$ (MPa)	$w$ (J)
Gr/Gr	$10^5$	$10^{-1}$

Tableau 4.1 – Paramètres de la loi CZM pour les échantillons homogènes.

Pour ce cas modèle, les effets des sollicitations pression et vitesse mais aussi l'effet de la cohésion locale au sein du troisième corps crée sont analysés.

## II.1 Impacts des sollicitations globales

### (a) Analyse mécanique

Dans cette première partie, la cohésion, au sein du troisième corps crée, est considérée comme nulle. Le matériau est dégradé suite aux sollicitations pression et vitesse (tel que dans le freinage ferroviaire) et évolue de manière pulvérulente dans l'interface.

L'échantillon est soumis à différentes pressions (pour une vitesse fixée) et à différentes vitesses (pour une pression fixée). Les pressions appliquées sont 0,24 / 2,38 / 11,9 / 16,7 MPa pour une vitesse de 20 m/s. Quant aux vitesses, elles ont pour valeurs 5 / 10 / 20 / 30 m/s pour une pression de 11,9 MPa. Cette plage de valeurs a été choisie pour être plus extrêmes que les valeurs rencontrées dans le freinage ferroviaire. Les valeurs fixées ont été choisies élevées afin d'exacerber les effets de la dégradation.

La figure 4.4 présente les différents instants finals de simulation pour différents couples  $(P,V)$ .

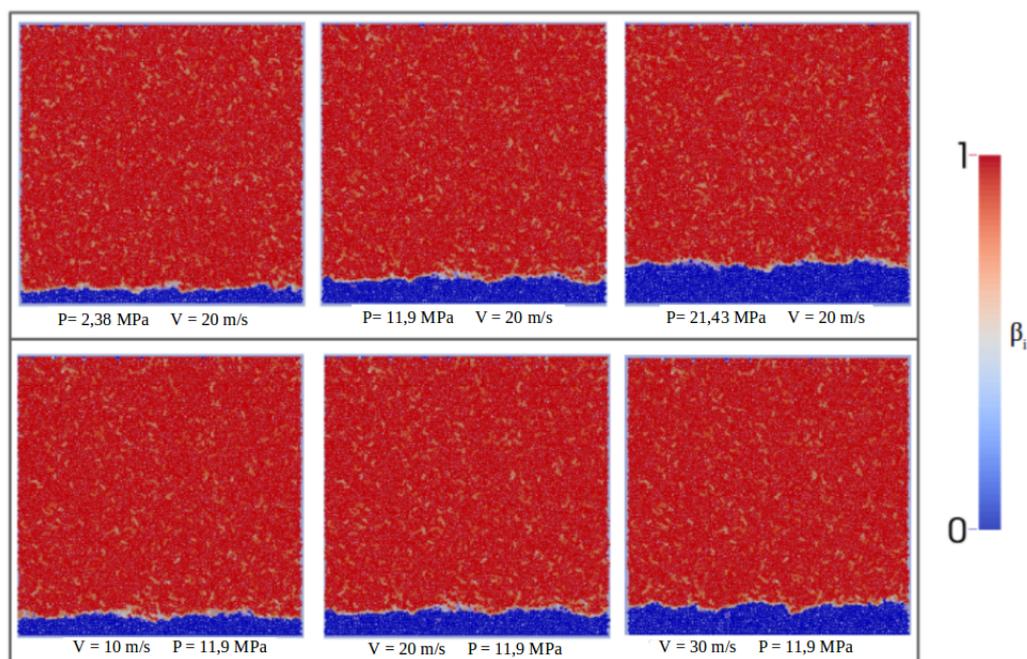


FIGURE 4.4 – Endommagement du VE pour différentes pressions et différentes vitesses : les particules de troisième corps sont représentées par la couleur bleu ( $\beta_i = 0$ ).

A la vue de la figure 4.4, un premier constat est de dire que lorsque les sollicitations augmentent (en termes de vitesse ou pression), la dégradation du matériau est plus im-

portante et le volume de troisième corps augmente (partie bleue). Ainsi, l'augmentation de la pression mais aussi de la vitesse de cisaillement dégrade davantage le matériau.

Pour quantifier cette évolution, la dégradation globale  $\omega$  est représentée sur la figure 4.5.

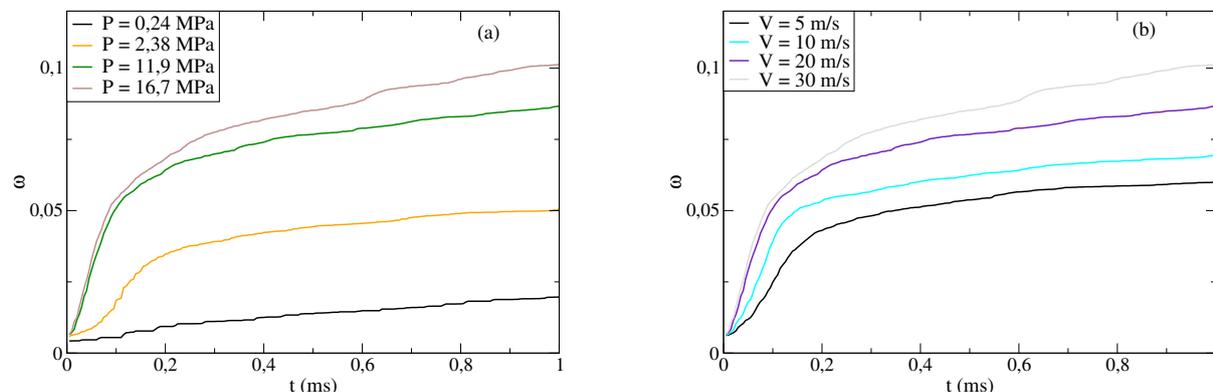


FIGURE 4.5 – Évolution de l'endommagement du VE pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses.

Sur ces graphes, deux phases d'évolution distinctes sont présentes : une phase d'évolution rapide (rodage) suivi d'une phase d'augmentation constante et dont le gradient est moins élevé. Cette diminution est expliquée par le fait que la couche de troisième corps générée pendant la phase de rodage protège le matériau sain. Le troisième corps s'auto entretient et peut protéger le matériau d'une dégradation brutale.

Le troisième corps évolue vers un volume limite caractérisé par la hauteur relative de troisième corps ( $h3C$ ) comparé à la hauteur totale du VE ( $H$ ). L'évolution de la dégradation  $\omega$  est tracée en fonction de ce rapport (exprimé en pourcentage de l'échantillon) (cf. fig. 4.6). Dans ce modèle (qui ne tient pas compte des débits d'usure), l'endommagement et la hauteur de troisième corps sont fortement corrélées et la relation entre ces deux grandeurs est quasi linéaire.

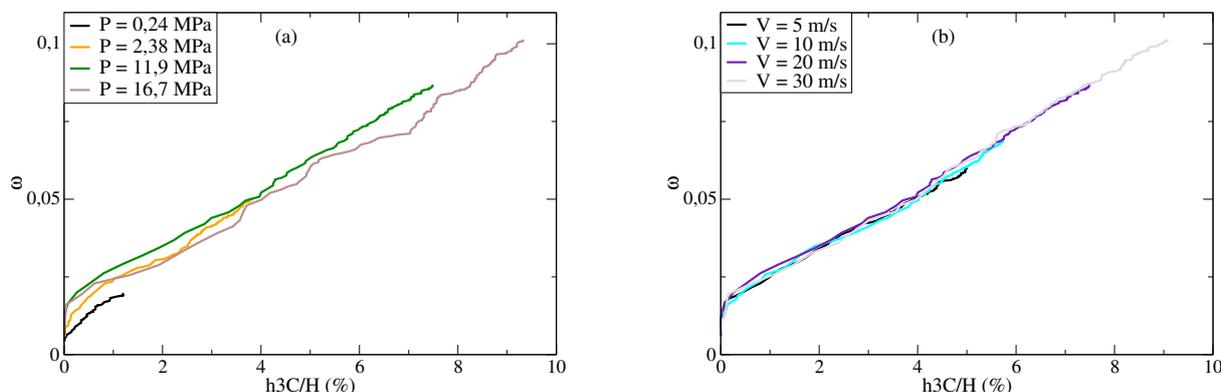


FIGURE 4.6 – Évolution de hauteur de troisième corps pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses.

Toutefois, l'évolution saccadée illustre un retard entre l'augmentation de la dégradation et la création de troisième corps. Cette remarque va de pair avec les premiers résultats montrant (lors de la phase de rodage) qu'une dégradation non négligeable est nécessaire afin de produire une couche de troisième corps.

Pour terminer, l'évolution du frottement global en fonction des sollicitations subies est illustrée sur la figure 4.7.

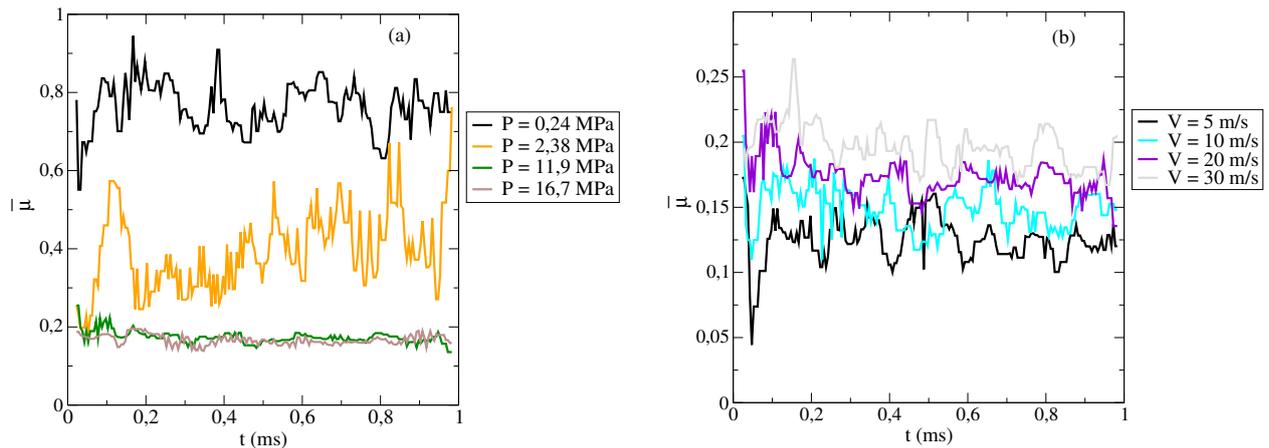


FIGURE 4.7 – Évolution du frottement global pour différentes pressions (a) et pour différentes vitesses (b).

Ce dernier est beaucoup plus élevé avec de faibles pressions qu'avec de plus fortes pour lesquels une valeur limite semble être atteinte. Au contraire, l'évolution de la vitesse provoque une augmentation du coefficient de frottement.

Le travail des forces de frottement est plus intense avec l'augmentation de la vitesse et plus faible avec l'augmentation de la pression. Ceci s'explique par le fait que hautes vitesses et faibles pressions induisent une dynamique plus importante pour les premiers et troisième corps. Ainsi, les forces de frottement ne sont pas forcément corrélées à une dégradation plus importante.

### (b) Effet des sollicitations sur la température

Après avoir représenté l'endommagement du VE sous diverses sollicitations, l'intérêt de cette partie est d'approcher les comportements thermiques qui sont la conséquence des phénomènes de dégradation (cf. fig. 4.8) bien qu'il n'y ait pas, dans le cadre de ces travaux, d'influence des phénomènes thermiques sur les comportements mécaniques.

On peut observer sur ces images que la chaleur est principalement localisée dans l'interface et augmente avec les sollicitations. L'augmentation de température paraît ainsi dépendre de la dégradation.

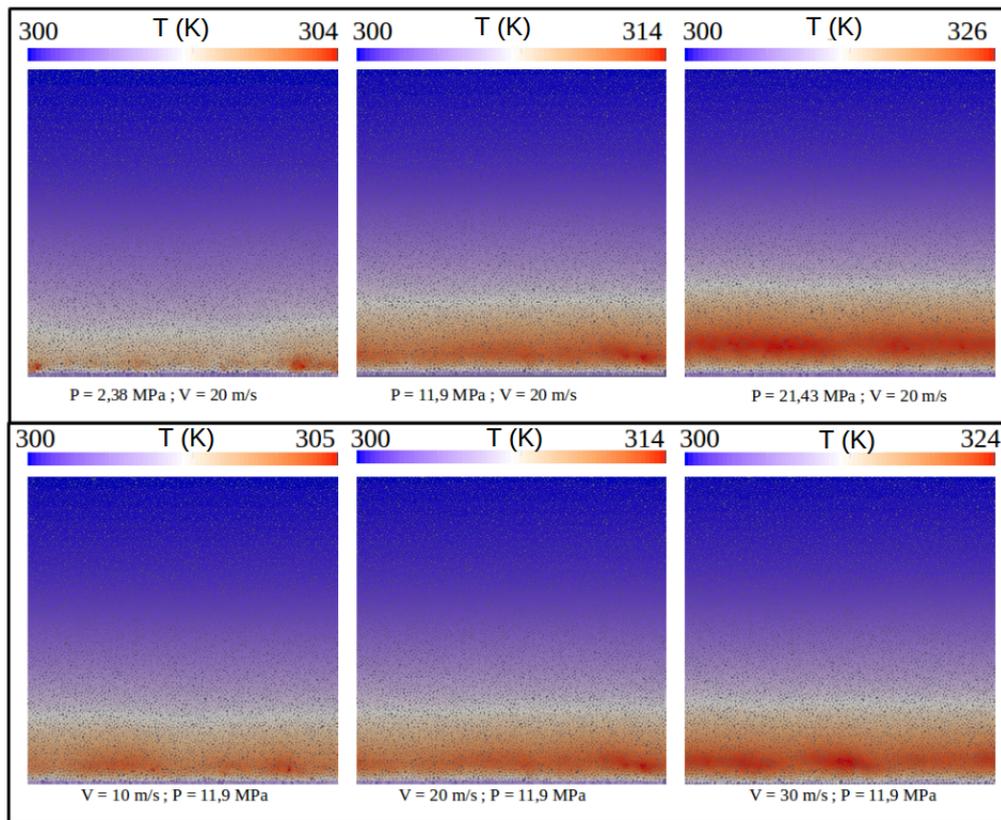


FIGURE 4.8 – Température au sein du VE.

A ces observations viennent s'ajouter l'analyse du maximum de température  $T_{max}$  au sein de l'échantillon, lié à la génération de chaleur (cf. fig. 4.9) et à l'analyse de la différence de température  $\Delta T$  entre les parois supérieure et inférieure, liée à la conduction de chaleur (cf. fig. 4.10) dans le milieu.

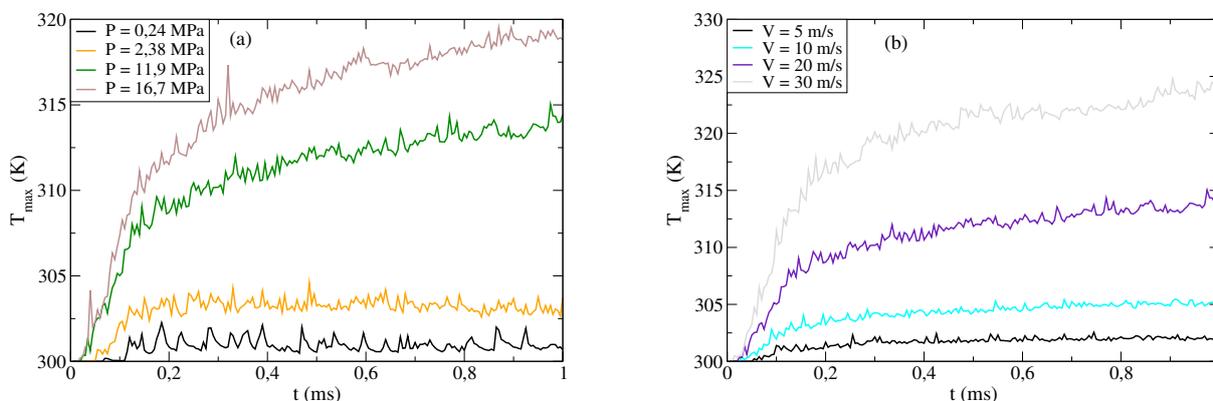


FIGURE 4.9 – Évolution temporelle des températures maximales au sein de l'échantillon pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses.

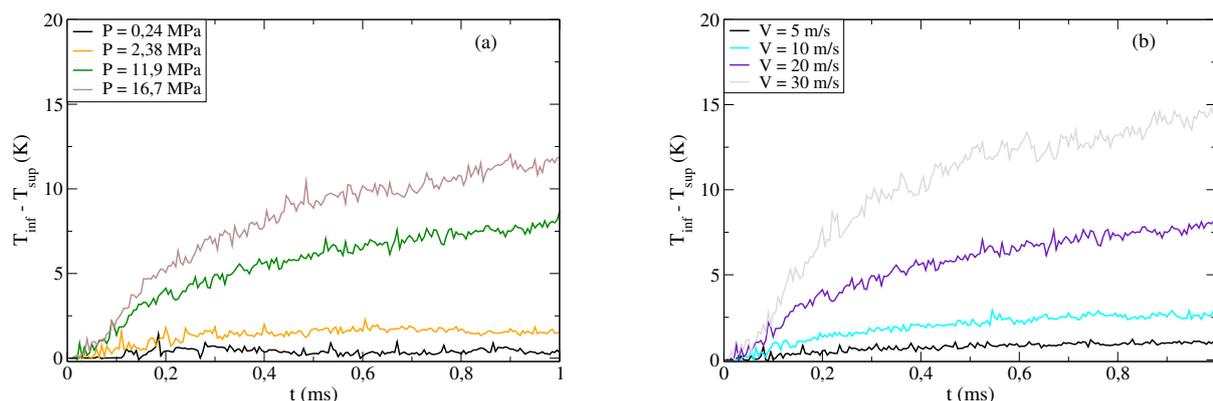


FIGURE 4.10 – Évolution des écarts de température entre les parois supérieure et inférieure du VE pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses.

Lorsque les sollicitations appliquées sont élevées, l'énergie dissipée suite aux effets mécaniques fait augmenter la température au sein du VE. De plus, l'élévation de température est corrélée à l'évolution de la dégradation (effets thermiques fortement dépendants des effets mécaniques).

L'élévation de la température est fortement dépendante de l'épaisseur de troisième corps (cf. fig. 4.11) au sein duquel est cumulé la plus grande partie de la chaleur dissipée. Ainsi, le troisième corps protège le volume du matériau d'une accumulation de chaleur et sert de barrière thermique.

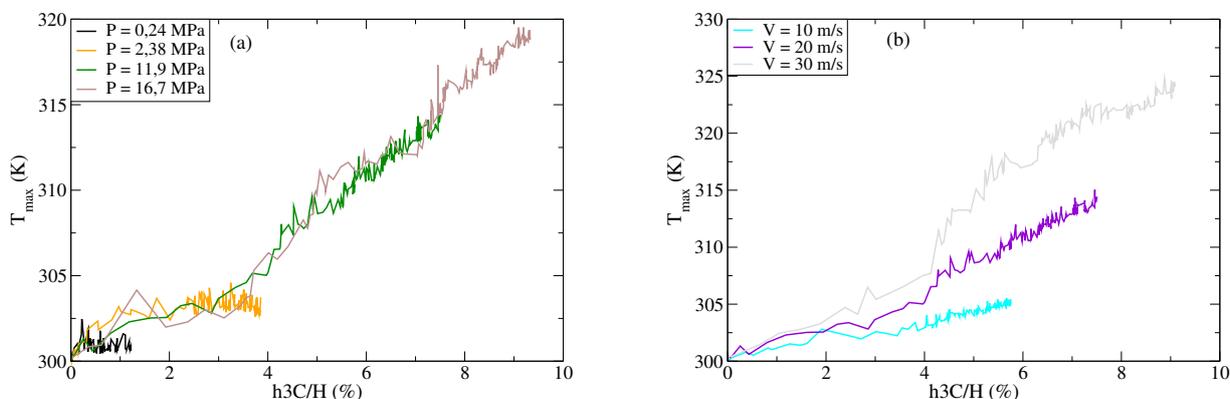


FIGURE 4.11 – Évolution du maximum de température au sein du troisième corps suivant l'épaisseur de celui-ci pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses.

On peut voir qu'à vitesse imposée, les courbes  $T_{max}(h_{3C}/H)$  suivent une même tendance soulignant qu'une faible épaisseur de troisième corps induit une faible chaleur et inversement. Ceci est bien entendu à prendre dans le cas où le troisième corps n'est pas présent, initialement, dans l'interface.

## II.2 Vers un troisième corps cohésif

Dans la seconde partie de l'analyse du modèle homogène, pression et vitesse sont fixées à 11,9 MPa et 20 m/s respectivement. Ces valeurs ont été choisies dans le but d'avoir

un fort effet de la dégradation. Des valeurs de cohésion locales ont été introduites dans le troisième corps créé, l'indice de cohésion est utilisé afin de rendre compte des divers résultats.

Pour rappel, les particules faisant parties du premier corps sont soumises à la loi CZM et les particules qui font parties du troisième corps sont soumises à une loi cohésive. La distance maximale à laquelle la force cohésive agit ( $d_w$ ) est prise à 20 % du rayon moyen et les valeurs de cohésion  $\eta$  sont comprises entre 0,0045 et 5,25 afin d'avoir un large éventail des effets cohésifs (cf. fig. 4.12).

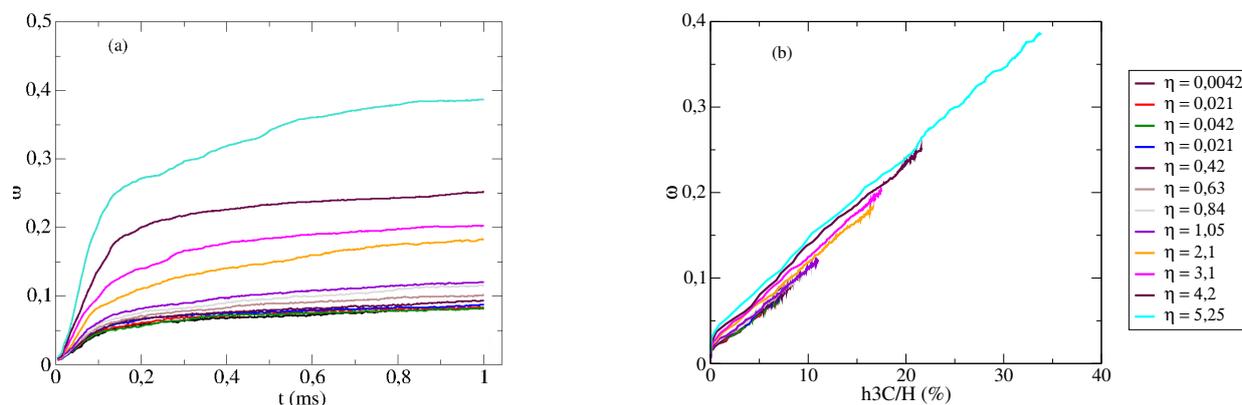


FIGURE 4.12 – Évolution (a) de l'endommagement de l'échantillon et (b) de la hauteur de troisième corps pour différentes cohésions, pour une pression de 11,9 MPa et une vitesse de 20 m/s.

La dégradation reste sensiblement la même pour les faibles valeurs de  $\eta$ . Lorsque la cohésion devient suffisamment importante, le débit source augmente créant davantage de troisième corps. Cela démontre un lien entre les interactions cohésives ayant lieu au sein du troisième corps et la dégradation du premier corps. La figure 4.13 corrobore ces observations, en effet, l'endommagement varie peu pour les faibles cohésions mais augmente brutalement au delà d'une certaine valeur.

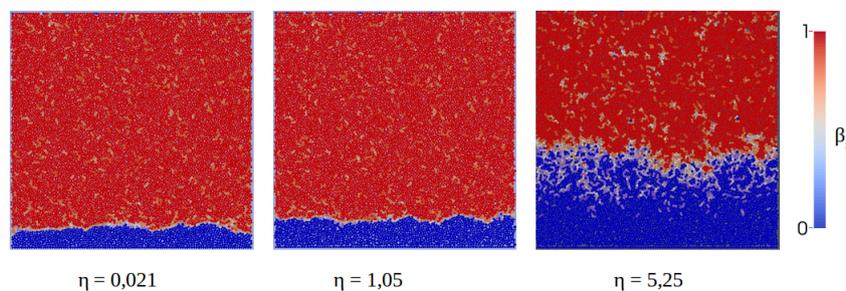


FIGURE 4.13 – Effet de la cohésion sur la dégradation du matériau.

Comme l'énonce Rivière [RIVI 15(2)], la cohésion est un catalyseur des variations de phénomènes. De plus, une relation quasi linéaire est observée entre la dégradation et la hauteur de troisième corps, montrant l'impact de la cohésion.

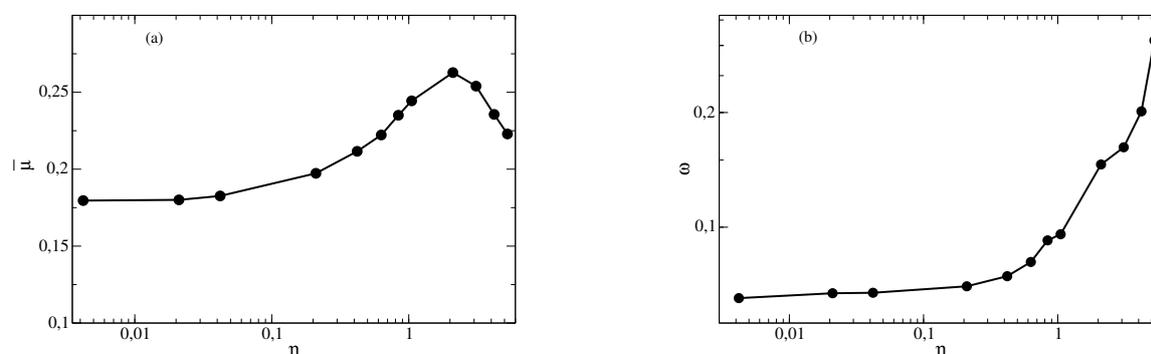


FIGURE 4.14 – Évolution (a) du frottement global moyen et (b) de la dégradation globale (en fin de simulation) en fonction de la cohésion pour une pression de 11,9 MPa et une vitesse de 20 m/s.

Suite à ces constats, l'évolution du frottement global est observé (cf. fig. 4.14). Celui-ci augmente avec la cohésion jusqu'à une certaine valeur avant de diminuer. Cette diminution semble être liée à la brusque élévation de la dégradation. La cohésion provoque ainsi une saturation du système. La saturation se produit pour des valeurs de  $\eta > 1$ , valeurs pour lesquelles la pression locale est dominante par rapport à la pression globale. De ce fait, cette saturation peut-être provoquée par une compétition entre phénomènes globaux et locaux.

On peut remarquer également que pour  $\eta = 1,05$ , l'épaisseur de troisième corps reste faible (moins de 10 diamètres de grain dans l'épaisseur). De ce fait les deux surfaces antagonistes restent corrélées induisant un frottement important. Au-delà de cette valeur, la hauteur augmente brusquement créant un troisième corps plus épais permettant de mieux accommoder le différentiel de vitesse.

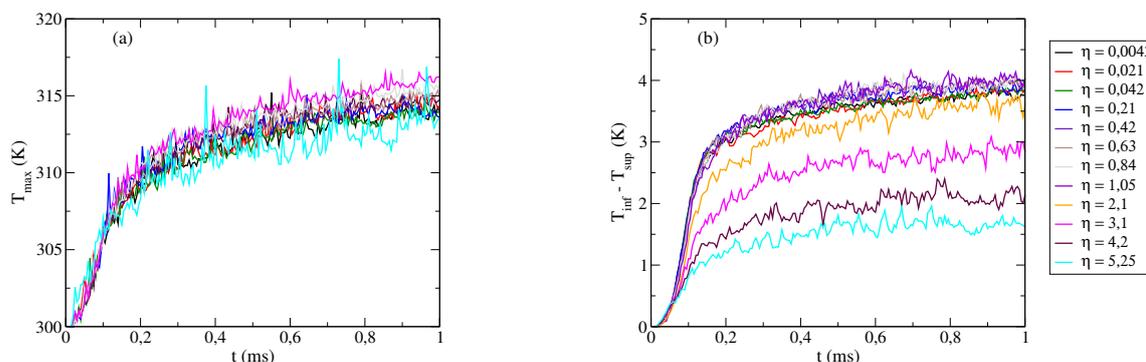


FIGURE 4.15 – Évolution (a) de la température maximale et (b) de la différence de température entre les parois, pour une pression de 11,9 MPa et une vitesse de 20 m/s.

Enfin, la cohésion locale influence également la température (cf. fig. 4.15). Bien que la température maximale au sein de l'échantillon ne connaisse pas de différences significatives, la différence de température entre les parois supérieure et inférieure est modifiée lorsque la cohésion est élevée, correspondant à la saturation précédemment évoquée. Ainsi, lorsque la cohésion devient trop importante, l'écart de température entre les parois s'amoindrit. La cohésion a tendance à "ralentir" les mouvements entre particules diminuant les mouvements relatifs au sein du troisième corps et donc la chaleur générée. Ceci explique la tendance de la chaleur à diminuer avec la cohésion.

### II.3 Un premier bilan

L'analyse du cas homogène permet de dégager (et de rappeler) les grandes tendances tels que les liens entre dégradations et sollicitations, l'influence de la cohésion ou encore les effets mécaniques influençant les effets thermiques. Les résultats obtenus sont en adéquation avec les tendances qualitatives observées dans la littérature [HU 08, ZHAO 01].

Toutefois, et de même façon qu'au chapitre précédent, un intérêt est porté sur le rôle des constituants dans la dégradation des matériaux. En effet, l'analyse homogène, bien que permettant de dégager des tendances, ne reflète pas la réalité. Dans un milieu réel, les matériaux sont le plus souvent multi-constituants.

## III Échantillon bi-phasique

Après avoir évalué le comportement d'un VE homogène sous sollicitations tribologiques, l'analyse d'un matériau bi-phasique constitué de graphite plongé dans une matrice métallique est proposée. La proportion de matrice varie de 0 à 100%, une illustration de différentes compositions est donnée en figure 4.16.

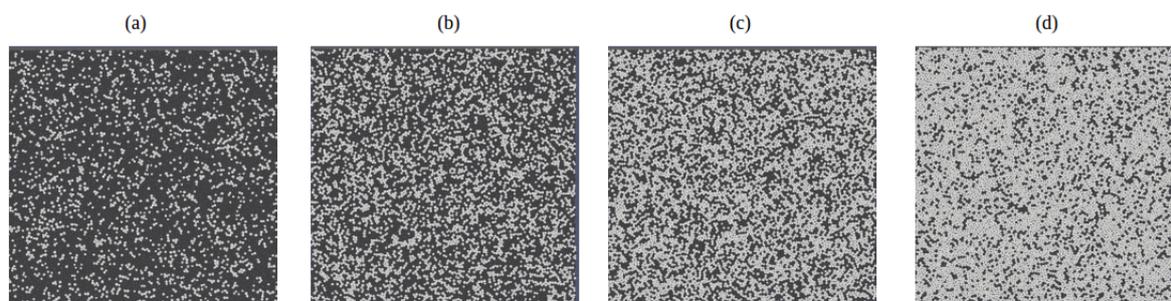


FIGURE 4.16 – Échantillon numérique dans le cas de (a) 20% de matrice, (b) 40% de matrice, (c) 60% de matrice et (d) 80 % de matrice.

Les valeurs des lois CZM sont reportées dans le tableau 4.2 quant aux interactions graphite/graphite (Gr/Gr), matrice/matrice (Ma/Ma) et graphite/matrice (Gr/Ma). La pression et la vitesse sont fixées, respectivement à 11,9 MPa et 25 m/s.

Interactions	$C_n$ (MPa)	$w$ (J)
Gr/Gr	$10^5$	$10^{-1}$
Ma/Ma	$5 \times 10^6$	1
Gr/Ma	$10^5$	$10^{-1}$

Tableau 4.2 – Paramètres de la loi CZM pour les échantillons bi-phasiques.

### III.1 Relation composition/frottement

Dans un premier temps, l'influence de la composition du milieu sur le frottement moyen est illustré par la figure 4.17.

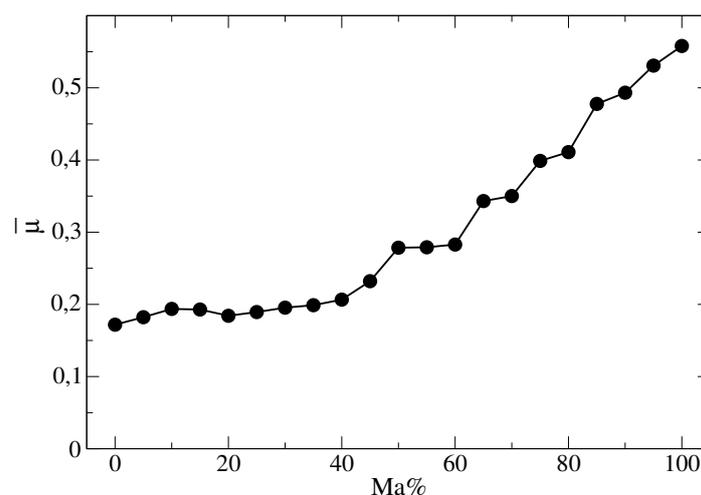


FIGURE 4.17 – Évolution du frottement global moyen suivant la proportion de matrice (Ma).

On peut noter que  $\bar{\mu}$  évolue peu jusqu'à 40% de matrice. Au delà de cette valeur,  $\bar{\mu}$  augmente beaucoup plus rapidement. Il existe donc une valeur critique exacerbant le frottement et l'énergie dissipée par le système. Cette observation se reflète sur la figure 4.18 où l'évolution de la température maximale est représentée, comme pour le frottement, en fonction de la proportion de matrice.

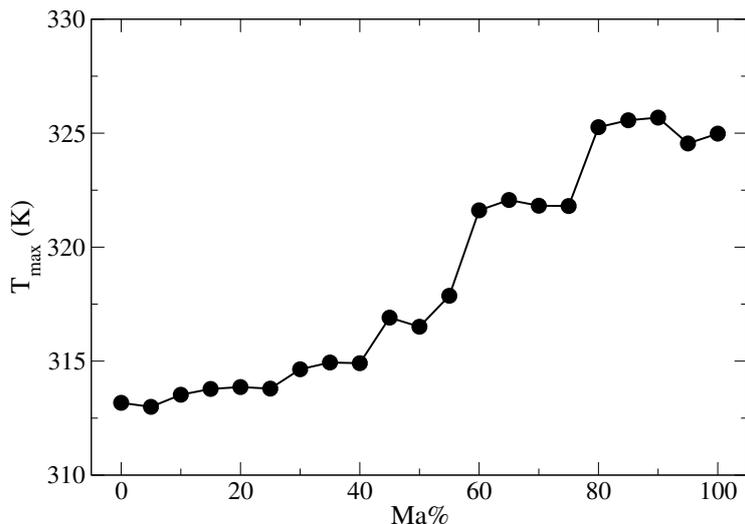


FIGURE 4.18 – Évolution du maximum de température (en fin de simulation) suivant la proportion de matrice.

Celle-ci est quasiment constante jusqu'à 40% puis, au delà,  $T_{max}$  semble augmenter par palier, à mesure que la proportion de matrice devient plus conséquente. De ce fait, tant que la matrice n'est pas majoritairement présente au sein de l'échantillon, le graphite permet de lubrifier le contact et ainsi préserver un frottement bas.

### III.2 Relation composition/endommagement

Les différents échantillons sont soumis à des essais de cisaillement et la dégradation  $\omega$  obtenu pour chaque échantillon est mesurée en fin de simulation puis reportée sur la Figure 4.19.

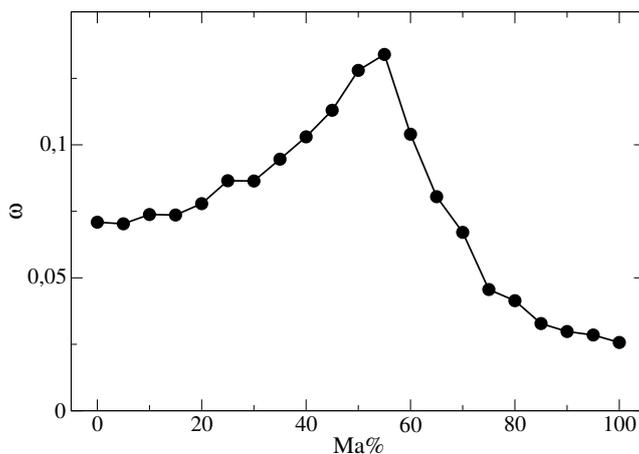


FIGURE 4.19 – Niveaux de dégradation pour différentes proportion de matrice à  $t = 0,5$  ms (en fin de simulation).

La courbe dégradation/composition n'a pas une allure monotone. En effet, la dégradation augmente jusqu'à une valeur critique de pourcentage de cuivre (autour de 55%), puis diminue. On aurait pu s'attendre à ce que plus la proportion de matrice augmente, plus la dégradation diminue. Cependant, jusqu'à une certaine proportion critique, le fait d'avoir des clusters de matrice dans du graphite peut fragiliser celui-ci et donc accélérer la dégradation du milieu. Pour compléter cette vision "statique", la figure 4.20 propose de visualiser une carte de densité permettant d'observer l'évolution de  $\omega$  en fonction du temps et de la proportion de matrice.

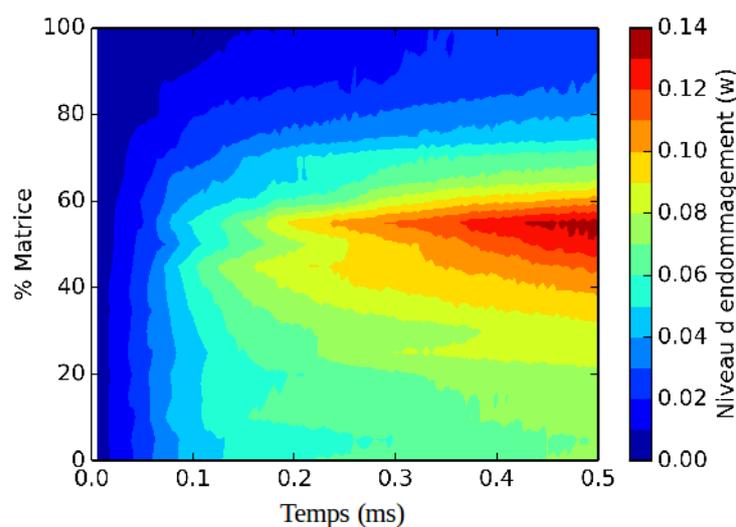


FIGURE 4.20 – Carte de densité des niveaux de dégradation en fonction du temps et de la proportion de matrice.

Sur cette carte,  $\omega$  augmente avec le temps illustrant alors une dégradation continue du matériau. Cela illustre les observations déjà effectuées pour le cas homogène, à savoir, une augmentation rapide de  $\omega$  durant la phase de rodage puis une augmentation constante sur le reste de la simulation. Outre la remarque précédente, le point le plus intéressant est la présence d'une proportion critique de matrice pour laquelle  $\omega$  est maximale et qui confirme les observations faites en figure 4.19. De plus, au-delà d'une proportion de 65%, l'évolution de  $\omega$  est plus lente, ce qui tend vers l'hypothèse d'une influence plus grande de la matrice lorsque celle-ci est en proportion majoritaire dans l'échantillon.

Pour chercher la proportion optimale de graphite dans le milieu, l'évolution non monotone de la dégradation est à coupler au frottement moyen. La dégradation la plus faible induit le frottement le plus haut (peu de troisième corps pour lubrifier le contact). L'ajout de graphite au sein de la matrice fait alors augmenter la dégradation et permet de réduire le frottement. Cette proportion ne doit pas être trop forte pour ne pas atteindre le pic autour de 55%. Une valeur de 75% semble être un bon compromis à la vue de ces premières observations.

### III.3 Influence des propriétés inter-phase

Pour compléter cette étude, l'influence des propriétés inter-phase est observée. Ce sont généralement les paramètres les plus difficiles à mesurer et il semble donc intéressant de voir la sensibilité des mesures globales à des variations de ces paramètres.

#### (a) Dégradation VS rigidité

La rigidité  $Gr/Ma$  prend ici les valeurs  $10^5$ ,  $10^6$  et  $2,5 \times 10^6$  dans le but d'encadrer les valeurs des interactions intra-constituants. La figure 4.21 illustre la dégradation, en fin de simulation, pour les trois interactions et pour trois valeurs de proportion de matrice.

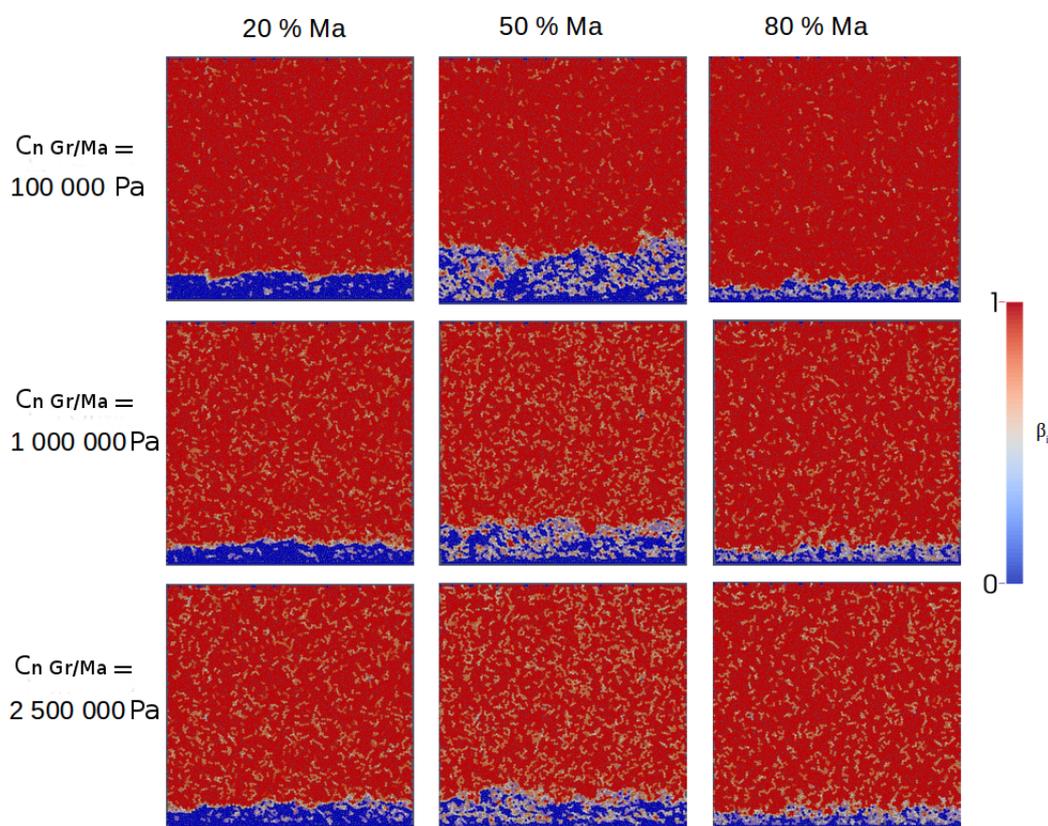


FIGURE 4.21 – Évolution de l'endommagement pour différentes proportions de matrice (Ma) et différentes rigidités  $Gr/Ma$ .

De même que précédemment, une proportion critique de matrice maximise la dégradation (cas à 50% de matrice). En première hypothèse, l'augmentation de la rigidité semble diminuer la capacité du matériau à se dégrader.

Pour quantifier ces observations, la figure 4.22 représente l'évolution de la dégradation en fonction de la proportion de matrice pour les trois valeurs de rigidité en fin de simulation. Toutefois, les résultats qui y sont présentés ne vont pas forcément dans le sens des premières observations. Pour  $10^6$  et  $2,5 \times 10^6$  MPa (des valeurs proches de la cohésion au

sein de la matrice),  $\omega$  se comporte de la même façon. Pour la valeur de  $10^5$  MPa, l'endommagement est en moyenne plus faible, même s'il est du même ordre pour les valeurs de 0, 50 et 100% de matrice.

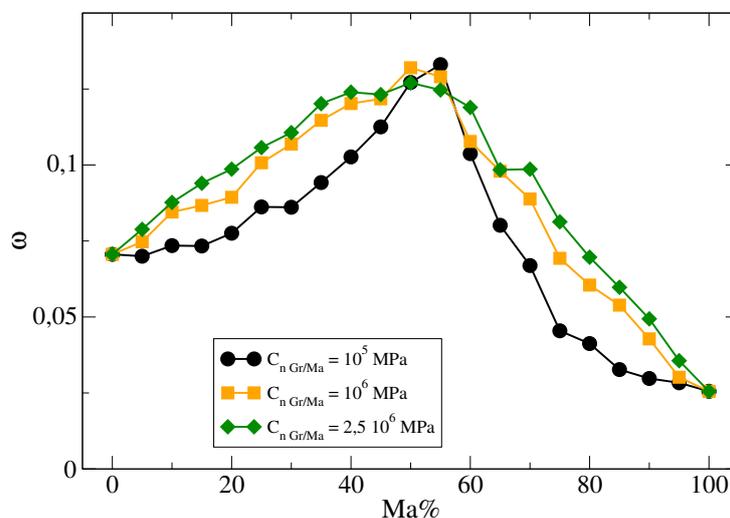


FIGURE 4.22 – Niveaux de dégradation pour différentes proportions de matrice à  $t = 0,5$  ms et pour différentes valeurs de rigidité Gr/Ma.

Pour une même énergie de décohésion, l'augmentation de  $C_n$  conduit à une diminution de la limite élastique et à une augmentation de la contrainte maximale. De ce fait, hormis pour les trois cas mentionnés précédemment, un matériau plus dur a tendance à être plus fragile.

### (b) Dégradation VS énergie de décohésion

L'énergie de décohésion a également un rôle important dans le processus de dégradation. En effet, c'est cette énergie qui détermine la ruine de la liaison. L'énergie de décohésion est gardée à 0,1 J pour l'interaction Gr/Gr et 1 J pour l'interaction Ma/Ma. Les valeurs de l'interaction Gr/Ma sont prises à l'intérieur de cet intervalle, à savoir 0,1 ; 0,5 et 1 J.

La figure 4.23 illustre l'évolution de l'endommagement pour différentes proportions de matrice (Ma) et différentes énergies de décohésion Gr/Ma. Logiquement, le matériau s'endommage moins pour une valeur plus élevée : l'énergie nécessaire pour séparer deux particules étant plus grande. Ces observations se confirment sur la figure 4.24 qui illustre l'évolution de  $\omega$ , suivant la proportion de matrice, en fin de simulation.

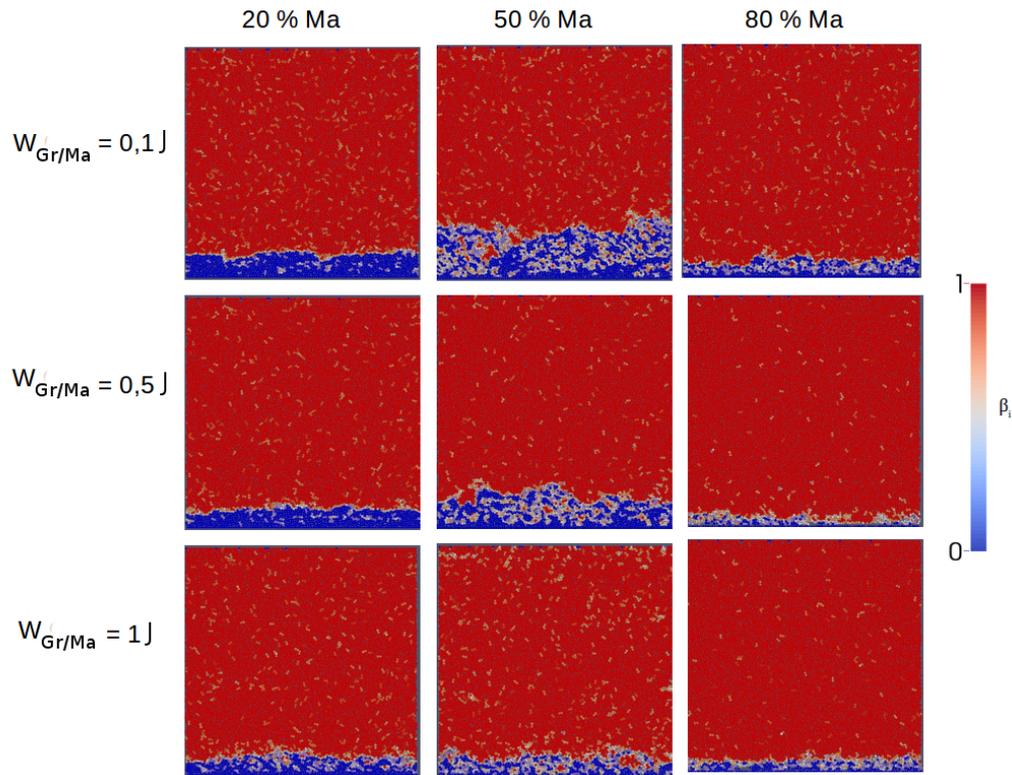


FIGURE 4.23 – Évolution de l’endommagement pour différentes proportions de matrice (Ma) et différentes énergies de décohésion Gr/Ma.

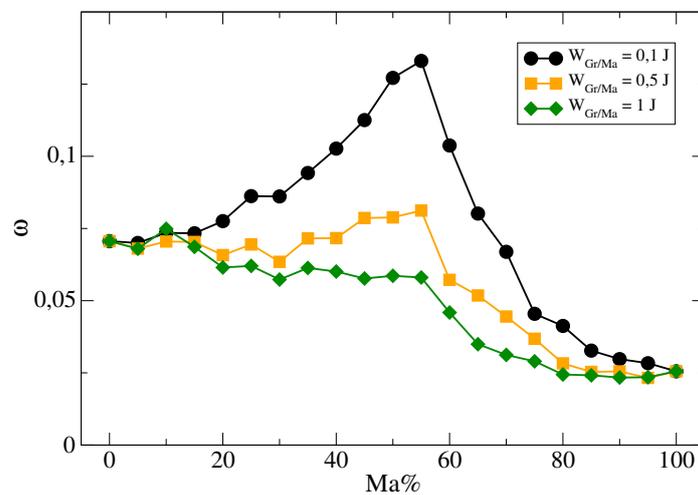


FIGURE 4.24 – Niveaux de dégradation pour différentes proportions de matrice à  $t = 0,5$  ms et pour différentes valeurs d’énergie de cohésion Gr/Ma.

On peut noter que  $\omega$  augmente jusqu’à la proportion critique de matrice puis décroît au delà de cette proportion. La valeur de  $\omega$ , à la proportion critique, est d’autant plus élevée que  $w$  est faible. Pour la valeur la plus forte de  $w$ , la démarcation liée à la proportion critique est quasiment inexistante. Cependant, il existe bien deux régimes autour de cette valeur.

(c) Dégradation VS cohésion locale

Pour clôturer cette étude, le paramètre  $\eta$  qui intervient dans le phénomène de cohésion entre particules de troisième corps a également été modifié pour l'interaction Gr/Ma (pour des valeurs de 0,1 ; 0,42 et 1). Les valeurs de  $\eta$  pour les interactions Gr/Gr et Ma/Ma sont fixées respectivement à 0,05 et 1.

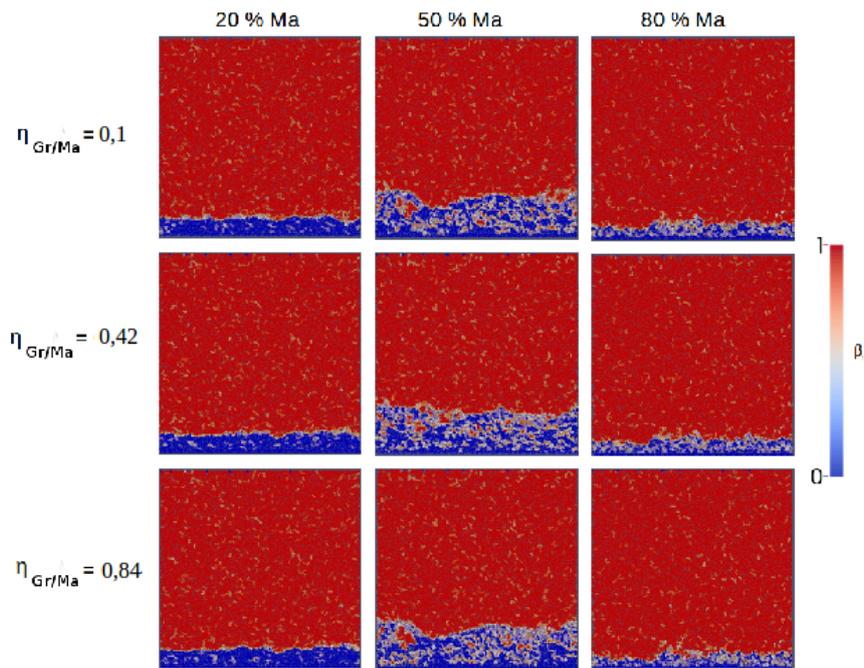


FIGURE 4.25 – Évolution de l'endommagement pour différentes proportions de matrice (Ma) et différents facteurs de cohésion  $\eta_{Gr/Ma}$ .

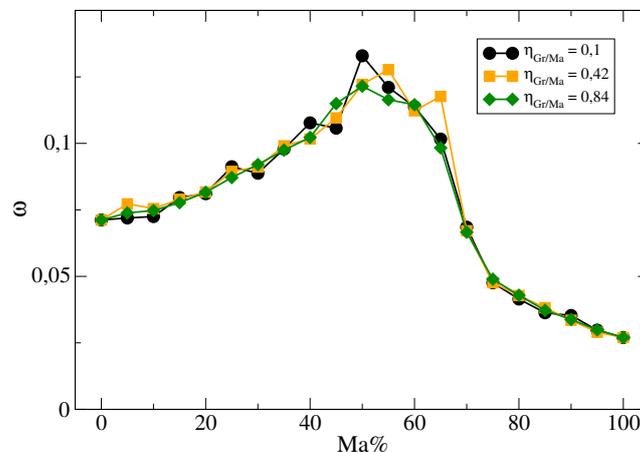


FIGURE 4.26 – Niveaux de dégradation pour différentes proportions de matrice à  $t = 0,5$  ms et pour différentes valeurs de cohésion locale de troisième corps Gr/Ma.

En se référant aux représentations numériques de la dégradation (cf. fig. 4.25), il semble que la cohésion n'ait pas d'influence sur la dégradation du matériau. La figure 4.26 permet d'observer plus finement l'évolution de  $\omega$  en fin de simulation et suivant la proportion de matrice.

Ces courbes illustrent de légères fluctuations mais non suffisantes pour expliquer une tendance claire quant à l'influence sur la dégradation.

### III.4 Un second bilan

Au cours de cette partie, l'existence d'une proportion critique de constituants au sein d'un matériau de freinage a été mise en évidence. Celle-ci permet d'optimiser le niveau de dégradation et de frottement du VE. De ce fait, ce travail peut-être considéré comme un modèle de base pouvant conduire à déterminer la proportion de chaque constituant la plus adaptée pour obtenir la plus faible dégradation du matériau tout en maintenant les qualités de freinage souhaitées.

Toutefois, plus il y a de constituants au sein du matériau et plus la difficulté est grande du fait de la prise en compte de toutes les interactions existantes entre les constituants. Il serait alors nécessaire de déterminer la plus faible dégradation pour chaque constituant et pour chaque interaction tout en maintenant les performances de freinage ainsi que l'intégrité du matériau. Il est nécessaire, pour cela, de tenir compte de ces mêmes interactions et ce, sans oublier l'impact environnemental. C'est ambitieux mais néanmoins nécessaire pour l'avenir du freinage ferroviaire, si ce dernier veut rester compétitif dans sa course perpétuelle à la vitesse.

Pour conclure, un échantillon bi-constituants est plus aisé pour analyser les interactions inter-constituants. Toutefois, il est nécessaire de prendre en compte la garniture complète afin d'appréhender les comportements réels ayant lieu dans les freinages ferroviaires.

## IV Du matériau réel au matériau numérique

### IV.1 Garniture G36S

#### (a) Présentation du matériau modélisé

Afin que la modélisation numérique illustre les tendances de comportement d'un matériau réel lors du processus de dégradation, le modèle numérique doit être enrichi afin d'être en adéquation avec ce matériau. Les matériaux industriels pour application au freinage sont des matériaux trop complexes pour atteindre des objectifs d'analyses réalistes. Ainsi, des projets industriels ont eu pour but d'effectuer l'élaboration de matériaux modèles de formulation simplifiée et de procédé d'élaboration maîtrisé tout en

restant compatible avec les performances industrielles recherchées. De ce fait, le matériau de freinage qui sert de base au modèle numérique est une garniture monobloc simplifiée nommée G36S (cf. fig. 4.27) destinée au freinage des TGV [SERR 14].

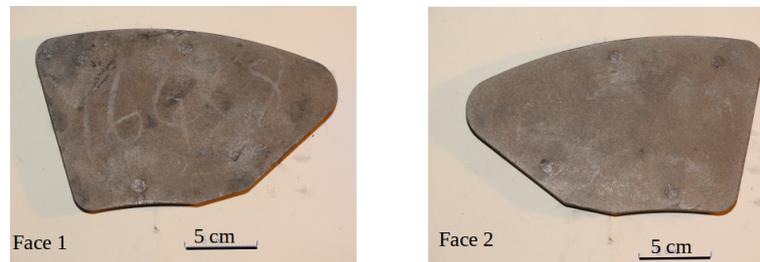


FIGURE 4.27 – Illustration de la garniture G36S.

La méthodologie développée dans le but de caractériser les matériaux simplifiés en termes de microstructure est basée sur l'utilisation couplée de l'imagerie en Microscopie Électronique à Balayage (MEB), de la cartographie X, des spectres d'analyse en énergie dispersive (EDS) et de la tomographie aux rayons X. Ces méthodes de caractérisation ont permis de déterminer certaines informations sur la microstructure telles que la composition et les propriétés des constituants. Le tableau 4.3 illustre la composition de la garniture en termes de constituants et de proportion volumique de ceux-ci.

Constituants	Proportion volumique (%)
Cu (cuivre)	13,9
Fe (fer)	20,7
Sn (étain)	2
MnS <sub>2</sub> (di sulfure de manganèse)	2,8
Gr1 (graphite 1)	16,1
Gr2 (graphite 2)	29,9
ZrSiO <sub>4</sub> (silicate de zirconium)	8,4
SiC (carbure de silicium)	3
Laine d'acier broyée	3,2

Tableau 4.3 – Composition de la garniture G36S

C'est principalement grâce au procédé de tomographie, qui va être décrite dans la suite, que la garniture G36S a pu être analysée numériquement.

### (b) Tomographie X

Cette méthode d'imagerie permet la reconstruction du volume d'un objet à partir de mesures effectuées par tranches surfaciques de cet objet (cf. fig. 4.28).

L'échantillon a été prélevé par carottage sur toute la hauteur de la garniture (5 mm de diamètre et 18 mm de hauteur). Les données tomographiques proviennent de l'ESRF

de Grenoble et le traitement a été effectué par une équipe du laboratoire de mécanique de Lille (LML). Les clichés issus de l'analyse tomographique présentent une taille de voxel<sup>3</sup> de 3,5  $\mu\text{m}$  équivalente à une résolution<sup>4</sup> de 7  $\mu\text{m}$ . L'identification des constituants se fait par niveaux de gris (cf. fig. 4.29).

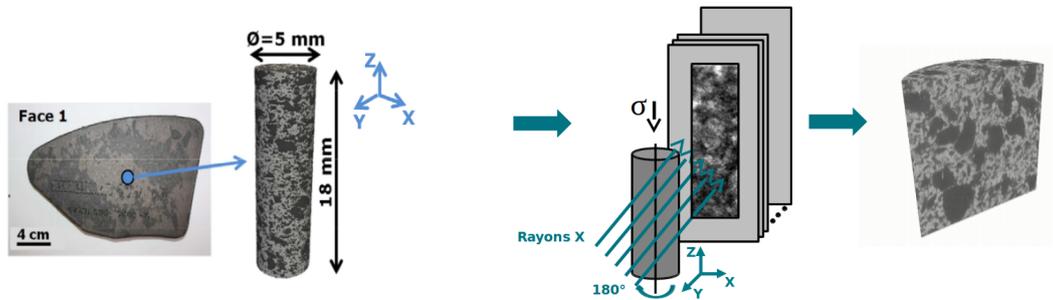


FIGURE 4.28 – Méthode de tomographie X : Prélèvement - Analyse par tranche - Reconstitution du volume [SERR 14].

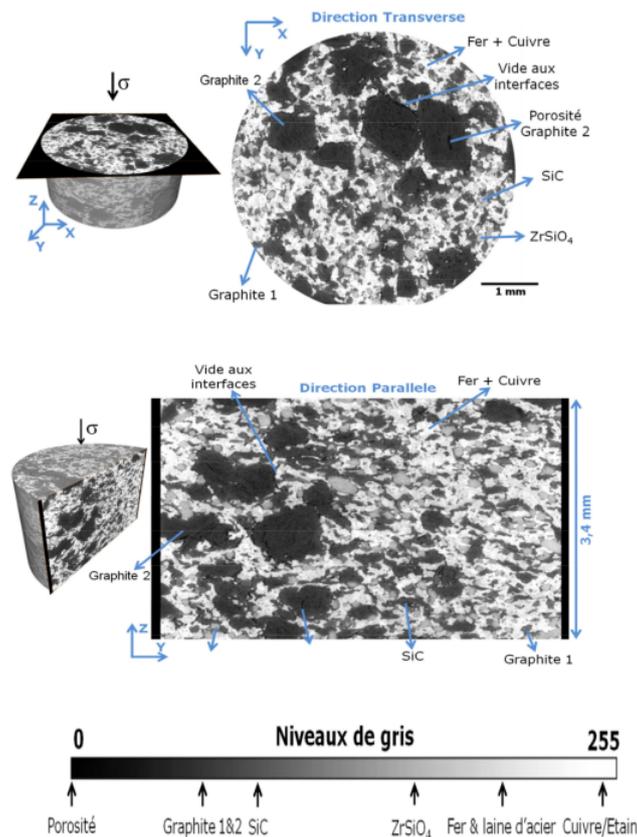


FIGURE 4.29 – (a) Exemple d'une coupe transverse (par rapport à la charge  $\sigma$ ), b) Exemple d'une coupe réalisée en parallèle à la charge de compression  $\sigma$  [SERR 14].

3. Un voxel est un pixel en trois dimensions, c'est-à-dire le plus petit élément d'une image, il consiste à stocker une information colorimétrique avec les coordonnées de celle-ci.

4. La résolution indique la densité de voxel par unité de volume.

En effet, la matière absorbe une partie des rayons X, différemment en fonction de ses constituants. Les niveaux de gris obtenus sur chaque projection acquise caractérisent la capacité d'absorption de ces constituants et permettent de les identifier. Les images issues des analyses tomographiques sont codées sur 8 bits et le niveau de gris varie de 0 à 255. Par exemple, une valeur de 0 correspond à un manque de matière et une valeur de 255 aux numéros atomiques les plus élevés.

La figure 4.29 illustre un exemple de la distribution des constituants en direction transverse et parallèle par rapport à la charge appliquée sur le matériau lors de l'usage industriel. Les différents constituants de la garniture (cf. tableau 4.3) sont mis en évidence dans cette analyse.

### (c) Segmentation

L'identification par niveaux de gris n'est toutefois pas suffisante pour assurer une identification fiable entre les zones identifiées et les éléments numériques. Pour isoler de manière adéquat les constituants (permettant des caractérisations plus quantitatives du matériau et le traitement numérique voulu), une étape de segmentation<sup>5</sup> est nécessaire [SERR 14].

Certaines plages de niveaux de gris sont partagées entre les différents constituants de la garniture, ce qui empêche leur complète segmentation. Le procédé de segmentation, effectué par le logiciel de traitement d'image Fiji, est décrit ci-après [SERR 14].

Le graphite 2 contient une certaine proportion de porosités qui ont un niveau de gris compris entre 0 et 40. Ces porosités sont faciles à segmenter. Cependant, les décohésions entre les constituants ont un niveau de gris commun (de l'ordre de 40 à 60) avec les graphites. Par conséquent, leur segmentation suivant cette méthode conduit à des proportions de porosité ou décohésion très bas qui ne sont pas représentatifs de la réalité.

Les graphites 1 et 2 et le SiC présentent le même niveau de gris. Les graphites sont ultérieurement segmentés en utilisant un critère de taille (plus élevée au niveau du graphite 2) mais les particules SiC ne peuvent pas être différenciées. De ce fait, suite à la segmentation, la proportion de SiC (3%) est distribué aléatoirement entre les proportions de graphite 2 et de graphite 1.

Une grande partie du  $ZrSiO_4$  est facilement segmentable. Toutefois, une partie de son niveau de gris (190 à 210) est partagée avec la matrice métallique. Ceci empêche une segmentation totale des particules de  $ZrSiO_4$ . Il en résulte une proportion de segmentation inférieure à la proportion présente dans la formulation (8,4%).

---

5. Opération de traitement d'images qui a pour but de diviser une image suivant les pixels (voxels) similaires afin de séparer les divers composants et de les identifier.

Enfin la matrice métallique est constitué par : Fe, Cu, laines d'acier, Sn et  $MnS_2$ . D'après la formulation, la proportion de matrice métallique atteint 42,6%. Cependant, à l'issu de la segmentation, la proportion de matrice est plus élevée, ce qui est dû, en particulier, à la présence d'une partie de particules  $ZrSiO_4$ .

Suite au procédé de segmentation, cinq zones sont identifiées au sein des clichés tomographiques : porosité (ou décohésion), graphite 1, graphite 2, matrice métallique et  $ZrSiO_4$  nommé céramique dans la suite (cf. fig. 4.30).

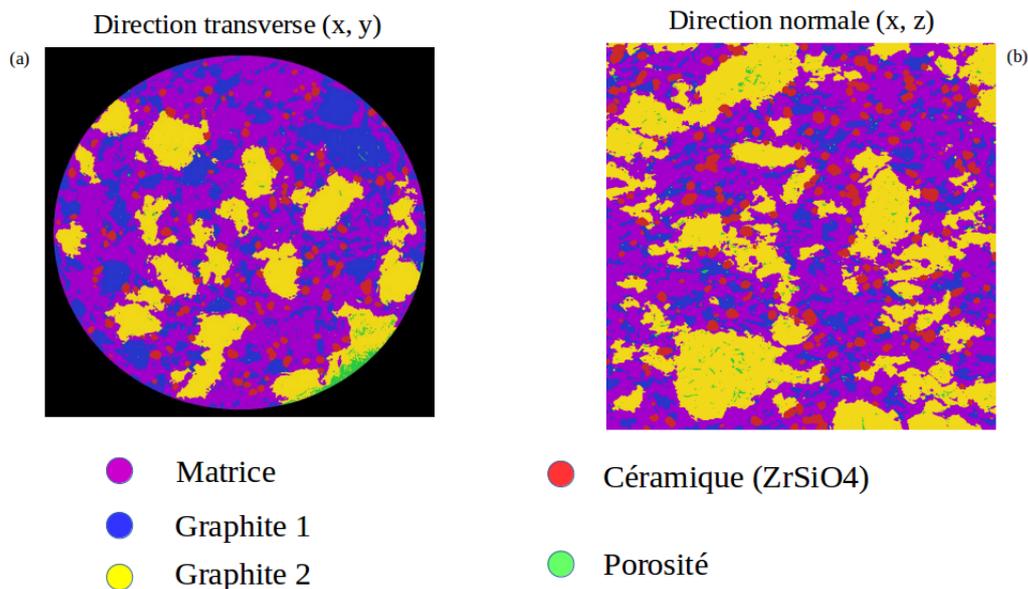


FIGURE 4.30 – Segmentation (a) transverse à la charge appliquée, (b) parallèle à la charge appliquée [SERR 14].

Modéliser numériquement la garniture avec les constituants ainsi segmentés s'avère être un bon compromis entre une représentation fidèle de la garniture mais sans une complexification trop importante du modèle numérique. Les images segmentées (telles que sur la figure 4.30) sont utilisées afin de générer un modèle numérique représentant la microstructure de la garniture. Toutefois, parmi les deux types de représentation (transverse et parallèle à la charge appliquée), ce sont les représentations parallèles qui sont utilisées dans le but que la surface dégradée numériquement corresponde à la surface dégradée dans les applications de freinage ferroviaire.

Suite à ces analyses issues de la tomographie, le modèle numérique basé sur la garniture G36S peut être généré. Les paramètres d'entrées du modèle numérique, permettant de définir les propriétés des particules, sont considérées constantes au cours des simulations et sont regroupés dans le tableau 4.4. Suite à cela, un échantillon numérique est généré, celui-ci ayant pour dimension 2,1 mm de côté et étant constitué d'environ 11 000 particules numériques (pour un rayon moyen de  $10 \mu m$ ). Ces dimensions permettent d'obtenir une

représentation assez fine de la garniture tout en ayant des durées de simulations qui ne soient pas trop importantes.

Matériaux	Matrice	Céramique	Graphite 1	Graphite 2
Masse Vol. ( $\text{g}/\text{mm}^3$ )	$7,13 \times 10^{-3}$	$4,67 \times 10^{-3}$	$1,88 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-3}$
Cond. Therm. ( $\text{W}/(\text{mm.K})$ )	$7,01 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$1,09 \times 10^{-2}$	$1,33 \times 10^{-1}$
Chaleur Spe. ( $\text{J}/(\text{g.K})$ )	498	400	720	720
Mod. d'Young (MPa)	98 000	350 000	7	2 000
Coeff. de Poisson	0,15	0,15	0,15	0,15

Tableau 4.4 – Paramètres mécano-thermiques associés aux particules numériques

Les paramètres des interactions résultantes (rigidité  $C_n$  et énergie de décohésion  $w$ ) sont reportés dans le tableau 4.5 (la matrice, la céramique, le graphite 1, le graphite 2 sont nommés respectivement par M, C, G1 et G2).  $C_n$  est déterminé suivant sa proportionnalité avec le module d'Young des constituants considérés [RIVI 15(2)]. Quant à  $w$ , une approche empirique des observations issues de la littérature [SERR 14] est effectuée.

Interactions	$C_n$ (MPa)	$w$ (J)
M/M	$5 \times 10^6$	1
M/C	$4 \times 10^6$	1
M/G1	$4 \times 10^2$	0,1
M/G2	$1 \times 10^5$	0,1
C/C	$2 \times 10^7$	5
C/G1	$4 \times 10^3$	0,1
C/G2	$1 \times 10^5$	0,1
G1/G1	$4 \times 10^3$	0,1
G1/G2	$4 \times 10^3$	0,1
G2/G2	$1 \times 10^5$	0,1

Tableau 4.5 – Paramètres locaux liés à la loi CZM

Au cours de ces analyses, les porosités ne sont pas prises en compte. Celles-ci sont assimilées, numériquement, à du graphite 2. En effet, la proportion de porosités est assez faible au sein des images segmentées et la majorité de cette proportion apparaît dans le graphite 2. De plus, il ne serait pas très pertinent d'analyser numériquement ces porosités du fait que l'échantillon compte de nombreuses porosités due à l'espace entre les particules numériques.

## IV.2 Choix du volume élémentaire

Afin de s'affranchir de la section issue de la tomographie, trois VE ont été choisis, à différents emplacements du matériau (par l'intermédiaire des clichés tomographiques) et de mêmes dimensions ( $2,1 \text{ mm} \times 2,1 \text{ mm}$ ). L'idée, ici, est de voir si d'un point de vue analyse, il faut une statistique importante d'échantillon, où si l'étude d'un échantillon

permet déjà de fournir les tendances générales. Les différents VE sont illustrés par la figure 4.31 (après implémentation dans le modèle discret).

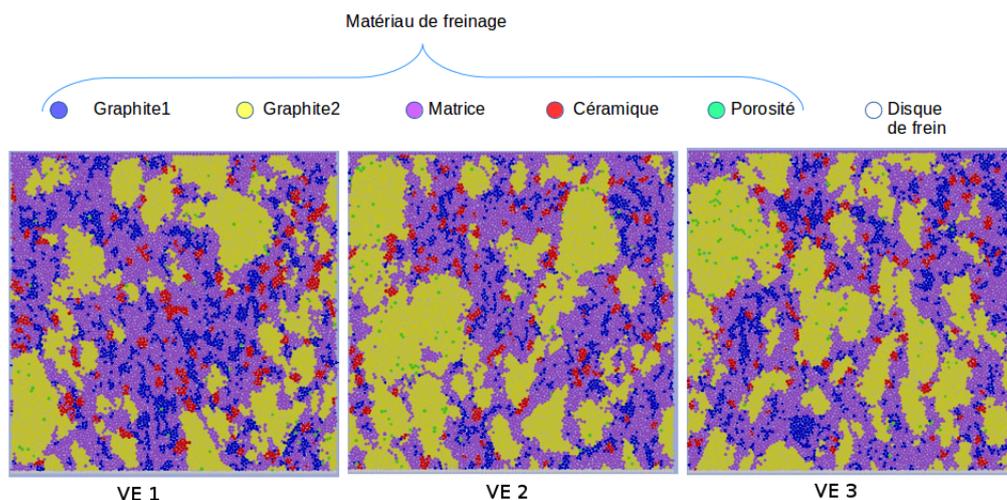


FIGURE 4.31 – Illustration numérique des VE.

La géométrie, les propriétés intrinsèques aux constituants ainsi que les lois d'interaction et les paramètres associés sont identiques. Ce qui diffère, c'est la proportion des constituants et leurs emplacements dans les échantillons. La figure 4.32 synthétise les proportions de constituants pour chaque VE.

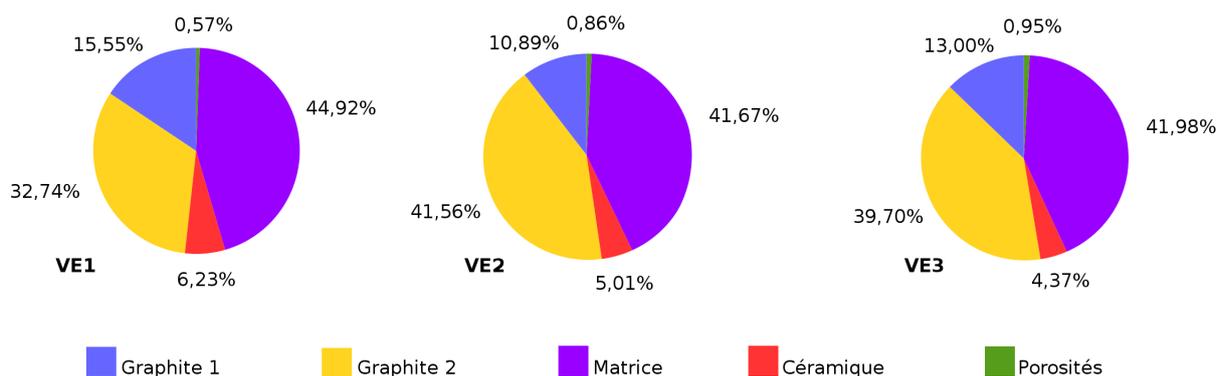


FIGURE 4.32 – Proportion de chaque constituant dans les différents VE.

Les VE 1, 2 et 3 sont composés d'un nombre de particules équivalents (aux environs de 11 000), la faible différence du nombre de particules générées entre chaque VE provient du choix aléatoire du rayon dans l'intervalle de polydispersité choisi, à savoir 20 % du rayon moyen. Les proportions sont similaires, bien qu'une faible différence soit présente.

Les trois VE sont ensuite soumis aux conditions classiques de cisaillement pour une pression de 11,9 MPa et une vitesse de 25 m/s. L'évolution de la composition du troisième corps est observée au cours du temps (cf. fig. 4.33).

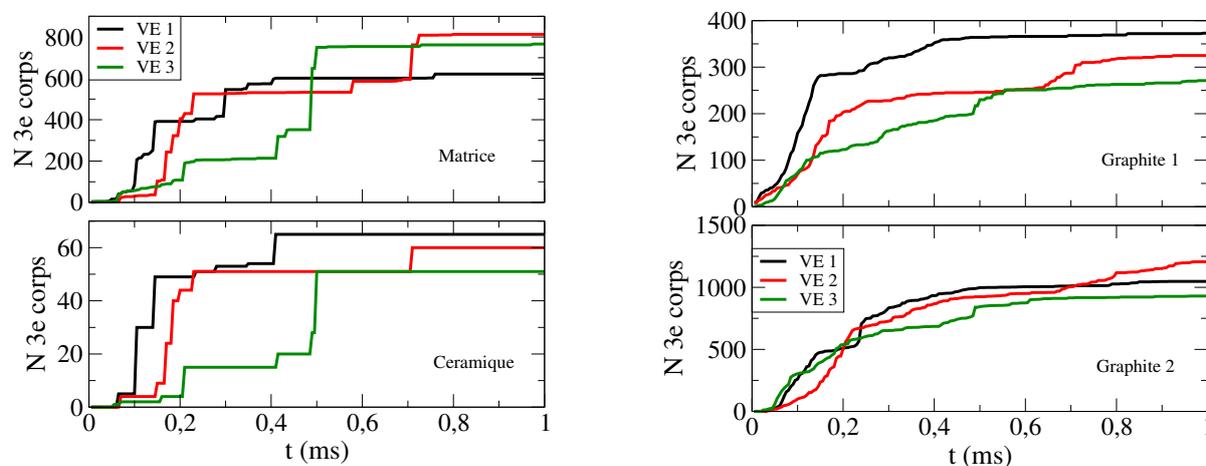


FIGURE 4.33 – Nombre de particules de troisième corps pour chacun des constituants et pour les trois VE.

Le nombre de particules de chaque constituants (matrice, céramique, graphite 1 et graphite 2) évolue dans des proportions similaires. Les interactions entre ces particules peuvent changer quelque peu les mesures globales de par la légère différence de constitution des troisièmes corps. Toutefois, les ordres de grandeur pour les particules des différents constituants sont proches et n'expliquerait pas des différences de comportements remarquables.

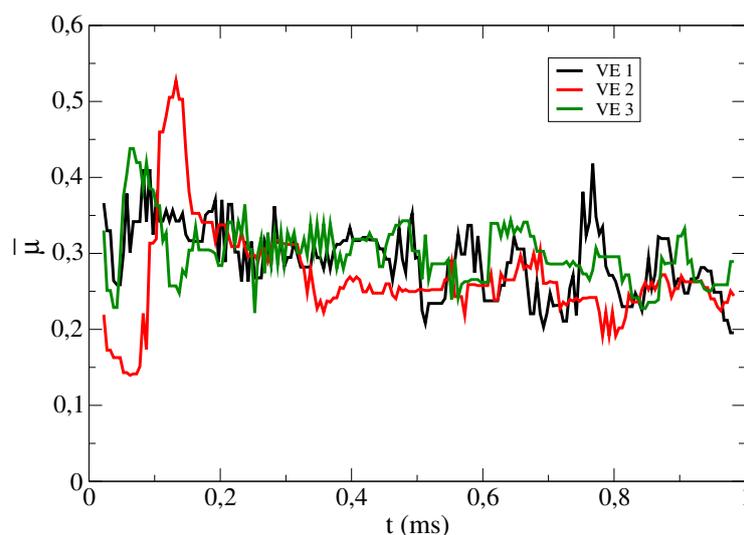


FIGURE 4.34 – Évolution du frottement global pour les trois VE.

Ici encore, le frottement moyen (observée sur la figure 4.34) est similaire pour les trois volumes. Le VE2 présente une évolution différente dans les premiers instants de simulation, mais son frottement rejoint ensuite l'évolution des deux autres VE.

Pour terminer cette comparaison, la figure 4.35 illustre l'évolution de la dégradation moyenne pour différentes valeurs de pression et vitesse. Une pression de 11,9 MPa a été appliquée pour des vitesses variant à 5 ; 15 ; et 25 m/s tandis que la vitesse a été fixée à 25 m/s pour des pressions de 0,24 ; 2,38 et 7,14 MPa.

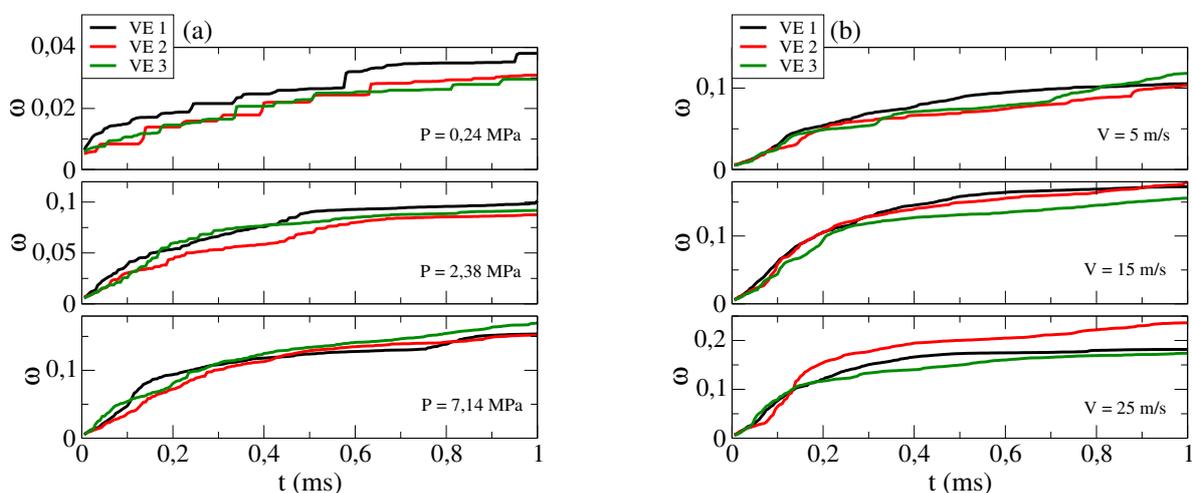


FIGURE 4.35 – Évolution de la dégradation pour les trois VE (a) pour différentes pressions et (b) pour différentes vitesses.

L'allure des courbes de dégradation (cf. fig. 4.35) est similaire pour les trois VE. Il y a bien sûr quelques différences au niveau des valeurs qui sont probablement dépendantes des types d'interactions, eux-mêmes dépendants de la proportion et de l'arrangement des constituants dans le matériau.

En conclusion, il semblerait que, bien que le niveau des courbes subissent quelques variations entre les différents VE, cette différence reste minime et les courbes conservent un comportement similaire. Ainsi, qualitativement, des comportements similaires sont observés entre les trois VE et c'est pourquoi cette étude peut être focalisée de façon plus approfondie sur le VE 1 qui se rapproche le plus des proportions du matériau réel.

### IV.3 Dégradation du matériau de freinage

#### (a) Analyse globale

Une fois le VE 1 sélectionné, des sollicitations (pressions, vitesses) sont appliqués sur l'échantillon, endommageant celui-ci tel qu'illustré sur la figure 4.36.

Comme dans les modèles précédents, le matériau s'endommage plus lorsque les sollicitations subies sont grandes. Cependant, contrairement à l'échantillon homogène, le troisième corps est constitué de fragments hétérogènes car tous les constituants du matériau ne se dégradent pas de la même manière.

Toutefois, les tendances de dégradation sont globalement similaires au modèle homogène (cf. fig. 4.37).

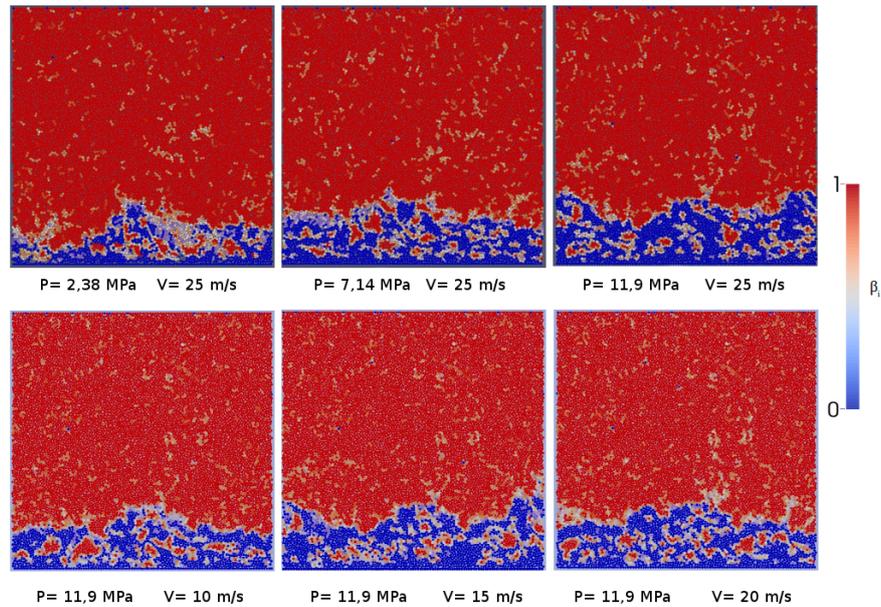


FIGURE 4.36 – Représentation de l'endommagement suivant les sollicitations.

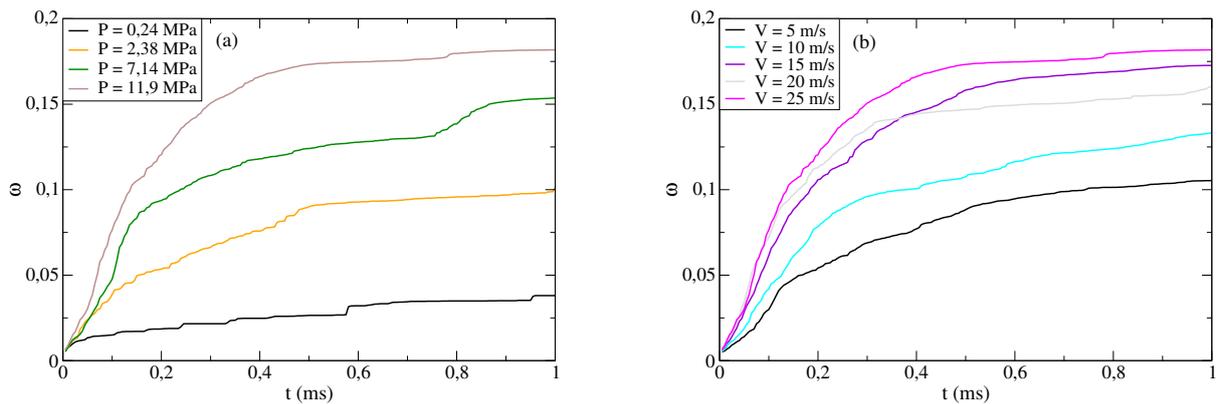


FIGURE 4.37 – Évolution de la dégradation du matériau suivant (a) la pression et (b) la vitesse.

L'évolution du niveau de dégradation augmente rapidement en début de simulation (rodage) avant une croissance constante. En termes de pression (cf. fig. 4.37 (a)), la durée de la partie rodage est de plus en plus élevée avec l'augmentation de la pression et la stabilisation de la croissance de  $\omega$  est plus longue à se mettre en place. Cette remarque peut également être faite dans le cas de la vitesse (cf. fig. 4.37 (b)), toutefois, pour le cas  $V = 20$  m/s, le matériau se dégrade moins (après phase de rodage) que pour le cas  $V = 15$  m/s mais cette différence reste minimale en fin de simulation ( $\omega = 0,16$  pour  $V = 20$  m/s et  $\omega = 0,17$  pour  $V = 15$  m/s).

Pour poursuivre la discussion concernant l'effet des sollicitations, le frottement moyen (cf. fig. 4.38) est observé.  $\bar{\mu}$  diminue avec la pression et augmente avec la vitesse, ce qui est sans surprise si il est fait référence au nombre inertiel qui est plus faible pour une forte pression et plus élevé pour une vitesse importante. Une compétition se produit entre

pression et vitesse, ce qui conduit à une dégradation du matériau d'autant plus grande que le produit  $PV$  est élevé.

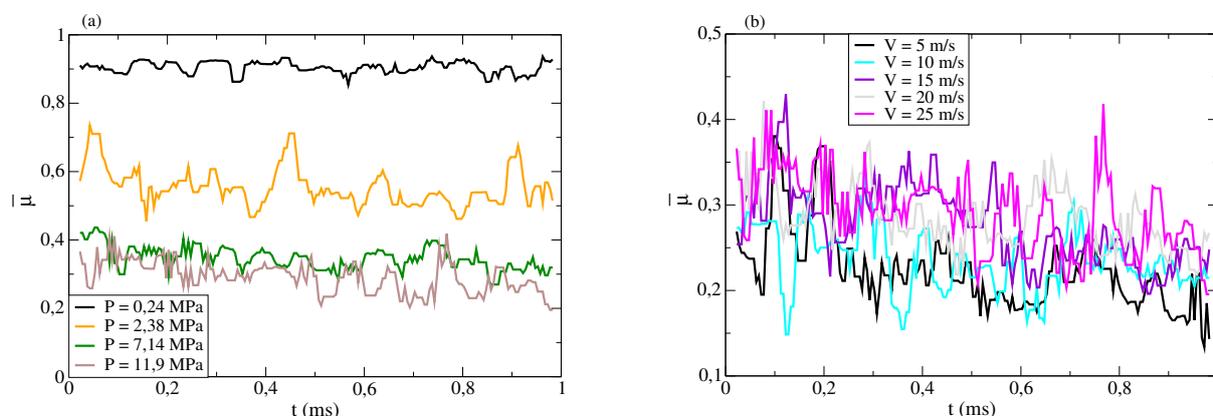


FIGURE 4.38 – Évolution du frottement global suivant (a) la pression et (b) la vitesse.

Une autre façon de comprendre l'effet des sollicitations est la rhéologie du troisième corps à travers la vitesse de ses constituants. Le rapport entre la vitesse des éléments au sein du troisième corps ( $V$ ) par la vitesse initiale ( $V_0$ ) est illustré en figure 4.39.

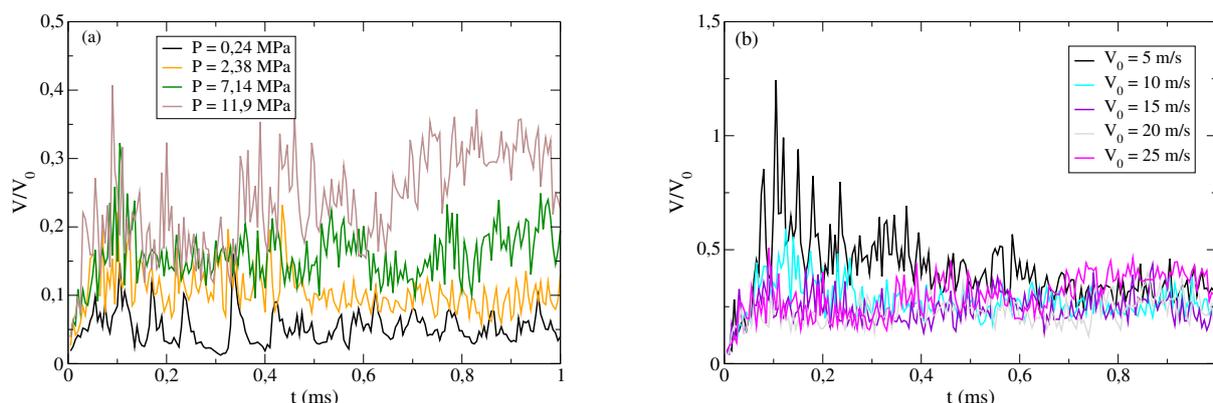


FIGURE 4.39 – Évolution de la vitesse moyenne au sein du troisième corps suivant (a) la pression et (b) la vitesse.

$V/V_0$  augmente avec la pression, cette dernière provoque une compression plus grande et engendre alors une vitesse plus grande, bien que le frottement diminue. Lorsque la vitesse initiale est modifiée, on pourrait s'attendre à des valeurs de  $V/V_0$  plus importantes avec l'augmentation de celle-ci mais ce n'est pas le cas, ces valeurs de vitesses relatives sont quasiment confondues en fin de simulation. Toutefois, dans la première partie des simulations, plus la vitesse initiale est faible et plus le rapport  $V/V_0$  est grand. Ainsi, le détachement des particules pour une faible vitesse initiale est plus difficile et conduit à une vitesse plus élevée au sein de l'interface afin de maintenir un équilibre entre vitesses globales et vitesses locales.

Enfin, l'évolution de la température au sein de l'interface est observée (cf. fig. 4.40). Celle-ci augmente lorsque pression et vitesse augmentent. Il semblerait que, sur cer-

taines zones, la température, bien qu'évoluant au sein du troisième corps, ait des zones hétérogènes [MAJC 03]. Si des concentrations thermiques existent, la solution la plus plausible est que certains constituants s'échauffent plus que d'autres.

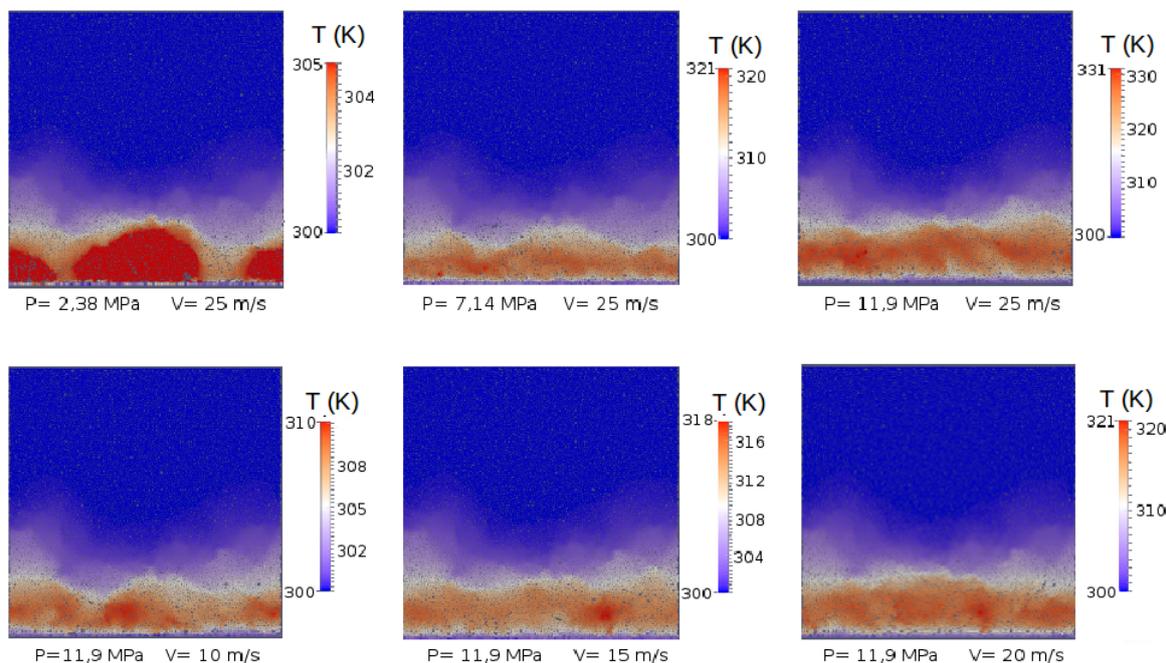


FIGURE 4.40 – Évolution de la température au sein de l'échantillon pour différentes sollicitations.

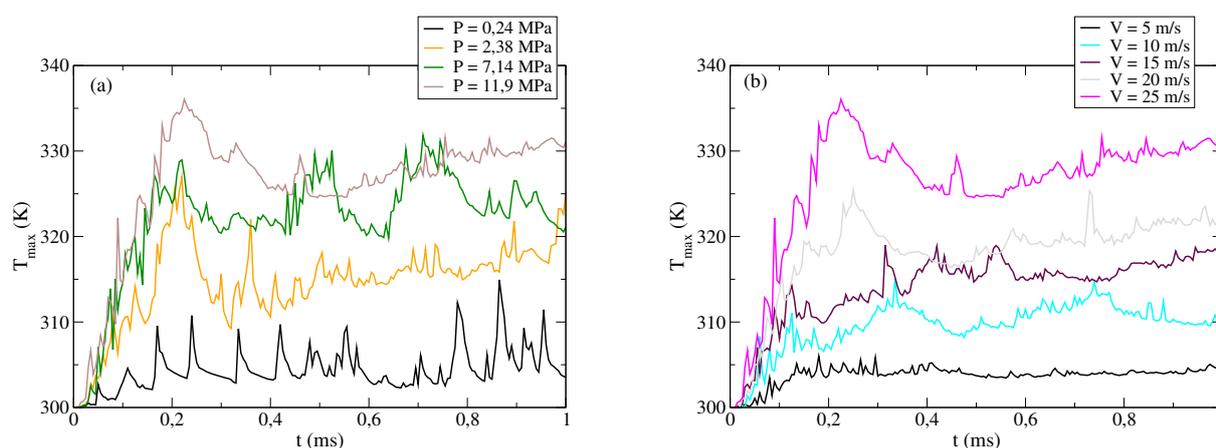


FIGURE 4.41 – Évolution de la température maximale au sein de l'échantillon pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses.

La température maximale illustrée en figure 4.41 est très élevée durant la phase de rodage. Lorsqu'un troisième corps stable est constitué, la température se stabilise dans l'interface. La croissance de la température maximale au sein de l'échantillon découle de la dégradation. Les mouvements entre particules sont d'autant plus importants que les sollicitations sont élevées,  $T_{max}$  augmente en conséquence.

L'effet de la propagation de chaleur au sein de l'échantillon (cf. fig. 4.42) évolue progressivement au cours du temps. Toutefois, pour les plus faibles sollicitations, cette évolution est moindre tandis que pour les sollicitations les plus fortes, l'évolution est plus importante et la chaleur se transmet entre les deux parois plus aisément.

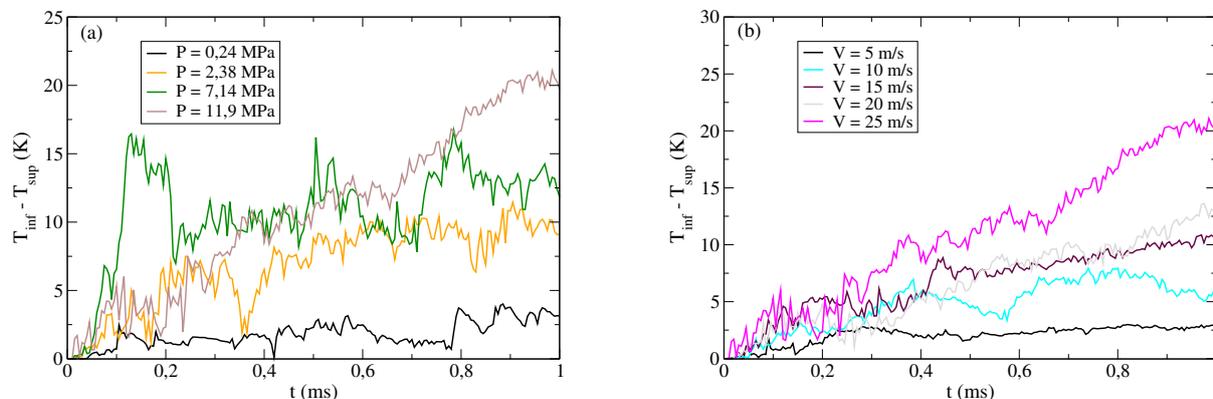


FIGURE 4.42 – Évolution de la différence de température entre les parois inférieure et supérieure pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses.

Dans les phénomènes d'usure [MAJC 03, COPI 00], la température est souvent citée comme étant liée à ce phénomène. Bien qu'ici, il ne s'agit pas encore "d'usure", il est intéressant de relier dégradation et température. Cette comparaison a été faite entre une image de simulation représentant l'endommagement et son homologue thermique pour d'assez fortes sollicitations ( $P = 11,9$  MPa et  $V = 25$  m/s) (cf. fig. 4.43).

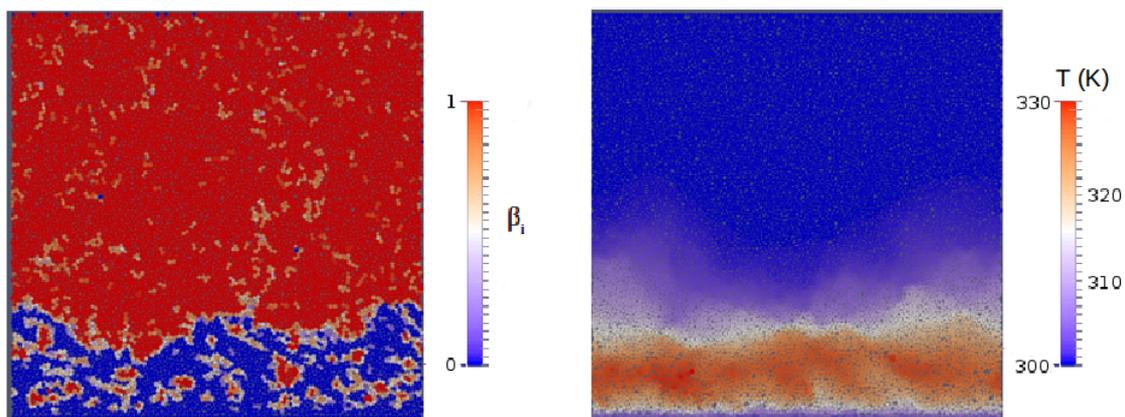


FIGURE 4.43 – Comparaison entre l'endommagement et l'évolution thermique pour  $P = 11,9$  MPa et  $V = 25$  m/s.

L'élévation de température est contenue dans la zone de troisième corps alors que les premiers corps sont peu impactés par celle-ci. C'est en corrélation avec les constats selon lesquels le troisième corps permet d'évacuer la chaleur et peut protéger les premiers corps d'une accumulation thermique.

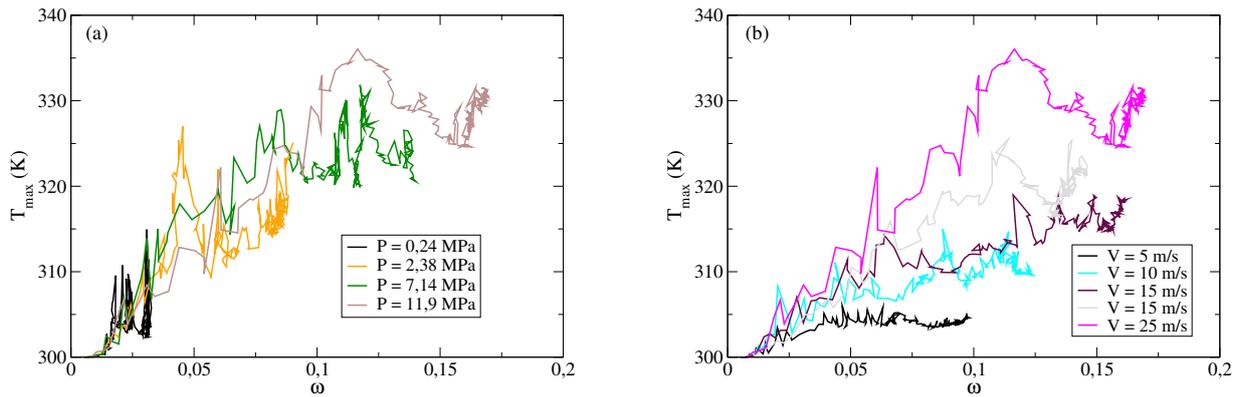


FIGURE 4.44 – Évolution de la température maximale en fonction de l'endommagement pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses.

La correspondance entre la température maximale et la dégradation est représentée en figure 4.44. Lorsque l'échantillon se dégrade, la température s'élève davantage et ce, d'autant plus que les sollicitations sont grandes. Ainsi, alors que le débit source est créé par les sollicitations et que la génération de chaleur est créée par ces mêmes sollicitations, on peut énoncer, au vu de ce qui précède que la génération de chaleur ( $T_{max}$ ) est liée au débit source engendré par  $\omega$ .

### (b) Analyse locale

Précédemment, lors de l'analyse globale, c'est la dégradation de la garniture qui a été analysée. Mais qu'en est-il de la dégradation des différents constituants ?

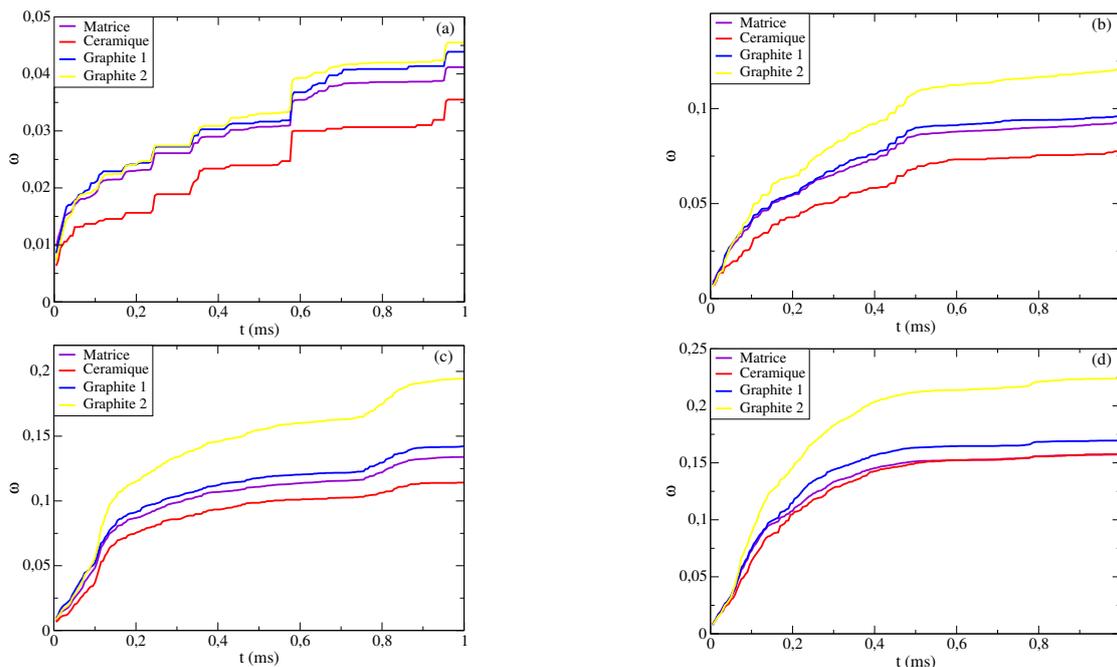


FIGURE 4.45 – Dégradation des constituants - Pour une vitesse de 25 m/s et des pressions de (a) 0,24 MPa, (b) 2,38 MPa, (c) 7,14 MPa et (d) 11,9 MPa.

La dégradation analysée pour chacun des constituants a été tracée, pour les différentes pressions (cf. fig. 4.45) et pour les différentes vitesses (cf. fig. 4.46). La moyenne des valeurs des  $\beta_i$  ont été déterminées pour chacun des constituants et normalisés par le nombre initial de ceux-ci. Il en a été déduit la variable  $\omega$  correspondante.

La céramique est le matériau qui s'endommage le moins (les interactions céramique-céramique ont l'énergie de cohésion la plus élevée). Puis vient la matrice qui se dégrade légèrement plus que la céramique mais dont l'endommagement reste faible. Les graphites sont les constituants qui se dégradent le plus. Jusqu'ici, cela reste logique en référence aux paramètres des lois d'interaction. Ce qui paraît plus illogique est la dégradation du graphite 2 qui est plus élevée que le graphite 1 et que celle-ci s'amplifie avec les sollicitations.

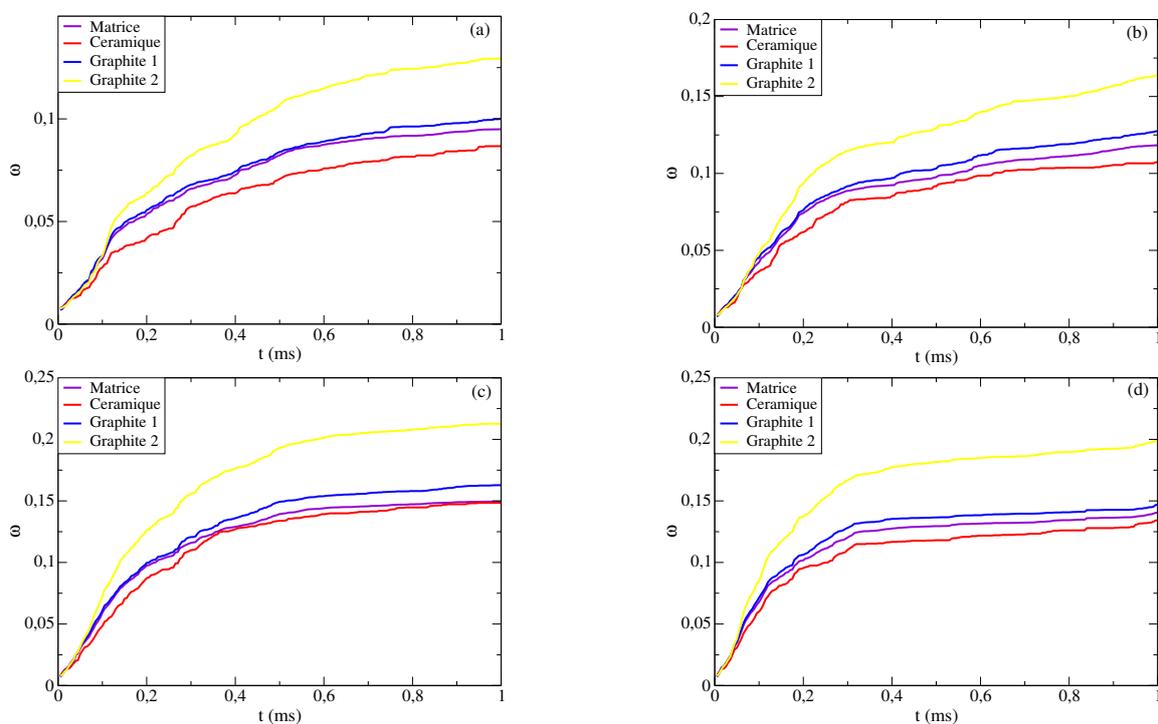


FIGURE 4.46 – Dégradation des constituants - Pour une pression de 11,9 MPa et des vitesses de (a) 5 m/s, (b) 10 m/s, (c) 15 m/s et (d) 20 m/s.

Pour la plus faible pression, l'écart entre les dégradations des deux graphites et de la matrice reste faible. Plus la pression augmente et plus le graphite 2 se dégrade rapidement par rapport aux deux autres tandis que l'écart entre graphite 1/matrice et céramique se réduit. Le graphite 2 est en plus grande proportion que le graphite 1 dans l'échantillon. Suite aux sollicitations, le graphite 2 a davantage tendance à se dégrader alors que le graphite 1 est potentiellement plus dégradé (paramètres locaux dont dépendent les interactions liées à ce constituant). Une hypothèse est qu'une pression plus importante comprime alors davantage le graphite 2 du fait qu'une plus grande proportion que le graphite 1 est présente dans l'échantillon.

En ce qui concerne la variation de vitesse (cf. fig. 4.46), il n'y a pas de différences aussi remarquables que dans le cas de la pression. La dégradation est plus importante pour le

graphite 2 qui semble être la principale source de dégradation. Ce constituant permet, en outre, de lubrifier davantage le contact et est utilisé dans ce sens dans la formulation des matériaux de freinage.

Afin de vérifier ces comportements locaux, la figure 4.47 compare l'état initial du matériau à deux états finaux, pour, respectivement, 2,38 et 11,9 MPa.

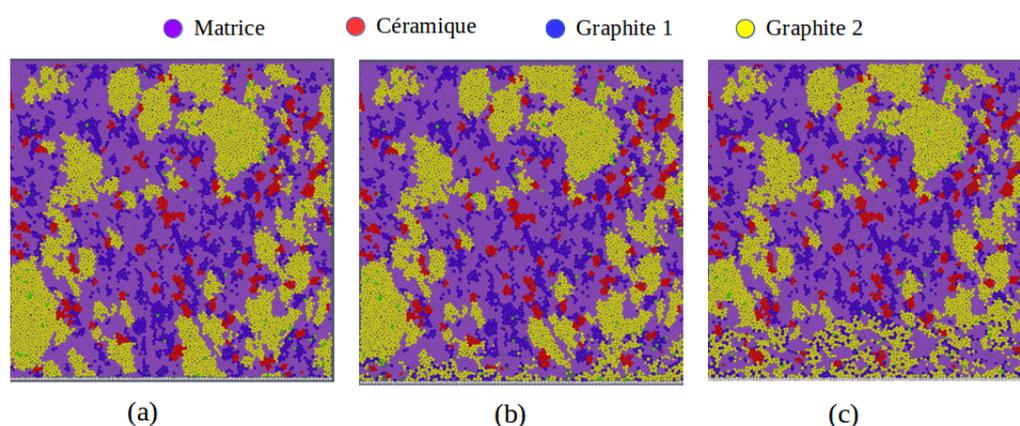


FIGURE 4.47 – Représentation (a) de l'état initial de la garniture et de son état final dans le cas (b) d'une pression appliquée de 2,38 MPa et (c) d'une pression appliquée de 11,9 MPa.

Une proportion importante de graphite 2 se trouve être en contact avec la surface frottante dans le cas initial. Lors de l'augmentation de la pression, un nombre plus conséquent de particules de graphite 2 sont dégradés.

Cette analyse de la dégradation suivant le type de constituants a permis d'appréhender les constituants se dégradant le plus et les premières hypothèses de ces raisons. Toutefois, afin d'aller plus loin dans l'objectif de comprendre le rôle de ces constituants, une analyse des fragments<sup>6</sup> formés et de leur répartition est indispensable.

### (c) Répartition des fragments

Le modèle est considéré comme étant constitué de fragments. A l'intérieur d'un fragment, il existe au moins une valeur de  $\beta_\alpha$  non nulle tandis que les valeurs de  $\beta_\alpha$  sont nulles entre un fragment et les éléments extérieurs.

La figure 4.48 présente des images de fin de simulation pour  $P = 11,9$  MPa et  $V = 25$  m/s.

6. Lorsque le matériau de freinage est dégradé, il se fragmente. On considère alors que l'échantillon est composé d'un certain nombre de fragments. Numériquement, des particules appartiennent à un même fragment dès lors qu'elles possèdent des liens CZM avec les autres particules de ce fragment. Si l'interaction est brisée entre deux particules ( $\beta_\alpha$  nul), elles appartiennent à des fragments différents.

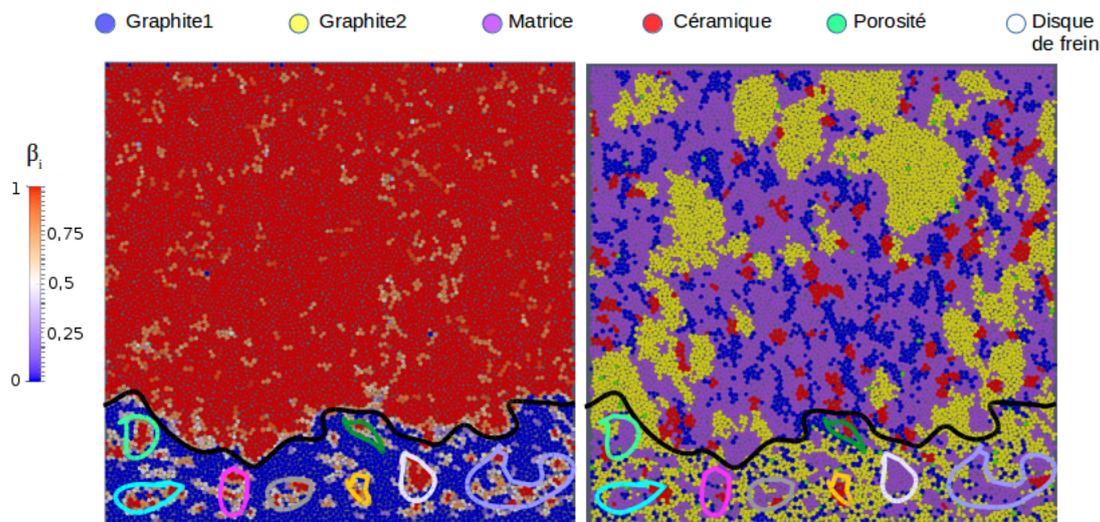


FIGURE 4.48 – Liens entre endommagement et matériaux pour  $P = 11,9$  MPa et  $V = 25$  m/s.

L'endommagement est représenté sur l'image de gauche et la garniture, sur l'image de droite. La démarcation approximative entre premier et troisième corps est illustrée. Au dessus de cette limite, un seul fragment est visible, et les constituants du matériau font parti du premier corps. En dessous de la zone de démarcation, de nouveaux fragments ont été créés. Côté endommagement, de nombreuses particules indépendantes circulent dans le troisième corps et, parmi celles-ci, des fragments qui ne font plus partis du premier corps mais au sein desquels se trouvent des liens CZM plus ou moins forts.

Sur cette figure, certains agglomérats ont été isolés suivant certaines couleurs distinctes entre les deux images pour repérer rapidement les mêmes positions. Comme il est possible de le constater, la plupart des agglomérats correspondent à la matrice ou la céramique. Et dans les zones entourées, lorsque des zones bleues sont présentes (à gauche), il s'agit de graphite 1 ou 2 (à droite). Il y a peu de graphite sous forme d'agglomérat et peu ou pas de céramique sous forme de particules pulvérulentes. Quand à la matrice, même si elle est préférentiellement sous forme d'agglomérats, une partie apparaît tout de même sous forme pulvérulente. Ces observations vont dans le sens de la dégradation relative aux différents constituants, illustrant une plus grande dégradation du graphite 2.

Le nombre de fragments obtenu en fin de simulation, suivant le type de constituant et de sollicitation fait l'objet de la figure 4.49. Dans le même sens que pour la dégradation, le nombre de fragments est différent pour chaque constituant et dépend des sollicitations. D'une façon générale, la céramique est le constituant qui possède le nombre de fragments le plus faible, puis vient la matrice et enfin les graphites. Pour ces constituants, davantage de fragments sont créés pour de plus fortes pressions et vitesses. Cette augmentation est principalement remarquable dans le cas du graphite 2 dont le nombre de fragments devient prépondérant par rapport aux autres avec les sollicitations.

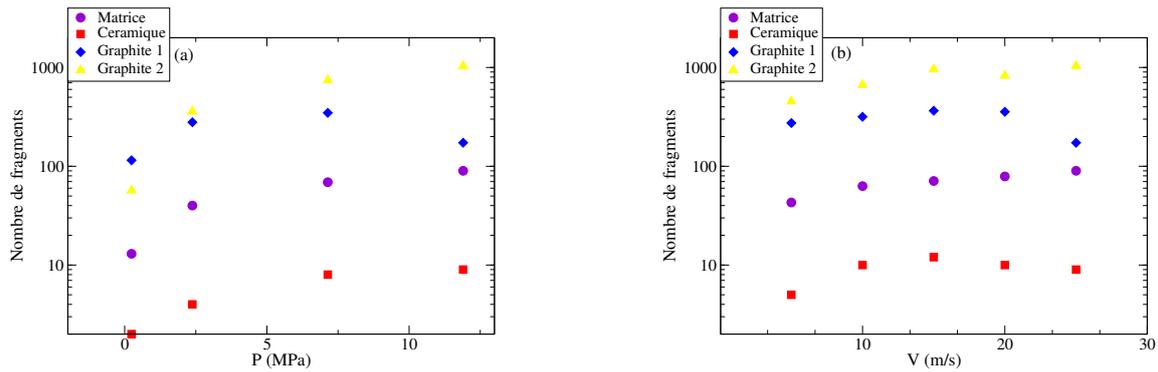


FIGURE 4.49 – Répartition du nombre de fragments pour chaque constituants, en fin de simulation, et suivant (a) pression et (b) vitesse.

Ces résultats permettent avant tout de voir l'évolution des fragments, pour chaque constituant, au sein du troisième corps. Toutefois, plusieurs extrapolations peuvent en être faite. Les constituants générant le moins de fragments se dégradent-ils simplement moins ou est-ce parce qu'ils sont en plus faible proportion au niveau de la surface frottante ? Il faut comprendre qu'un fragment peut être composé d'une seule particule, ou de plusieurs centaines... Pour être plus complet dans cette description, une analyse de la proportion du troisième corps, en terme de fragments (particules pulvérulentes ou agglomérats de particules) est effectuée.

Les proportions de chaque constituant présent dans le troisième corps, en fin de simulation, sont répertoriées pour les différentes pressions (cf. fig. 4.50), suivant leur état (pulvérulent ou agglomérat).

Comme les résultats précédents l'ont montré, l'échantillon se dégrade davantage avec la pression. Ainsi, la couche de troisième corps augmente avec celle-ci. Cependant, pour la plus faible pression, le graphite 1 est majoritaire dans le troisième corps, cette proportion diminue avec l'augmentation de la pression tandis que la proportion de graphite 2 subit une forte augmentation. De plus, pour ces deux constituants, la proportion d'agglomérats diminue alors que la proportion de particules pulvérulentes augmente. En effet, comme vu précédemment, ces deux constituants se dégradent le plus du fait de leurs paramètres d'interaction, ainsi, les effets de la pression les dégrade rapidement en leurs constituants élémentaires.

La céramique est en faible proportion et uniquement sous forme d'agglomérats. Ce constituant se dégrade peu et lorsqu'il est arraché au premier corps, il reste sous forme de fragments de plusieurs particules numériques. La matrice possède des liens de cohésion forts et se dégrade moins que le graphite mais du fait de sa forte proportion à la surface de contact, une partie est entraînée dans le troisième corps. Cependant, cette partie est principalement sous forme d'agglomérat et augmente légèrement avec la pression. Il y a assez peu de matrice à l'état pulvérulent (de l'ordre de 2% de la proportion de troisième corps).

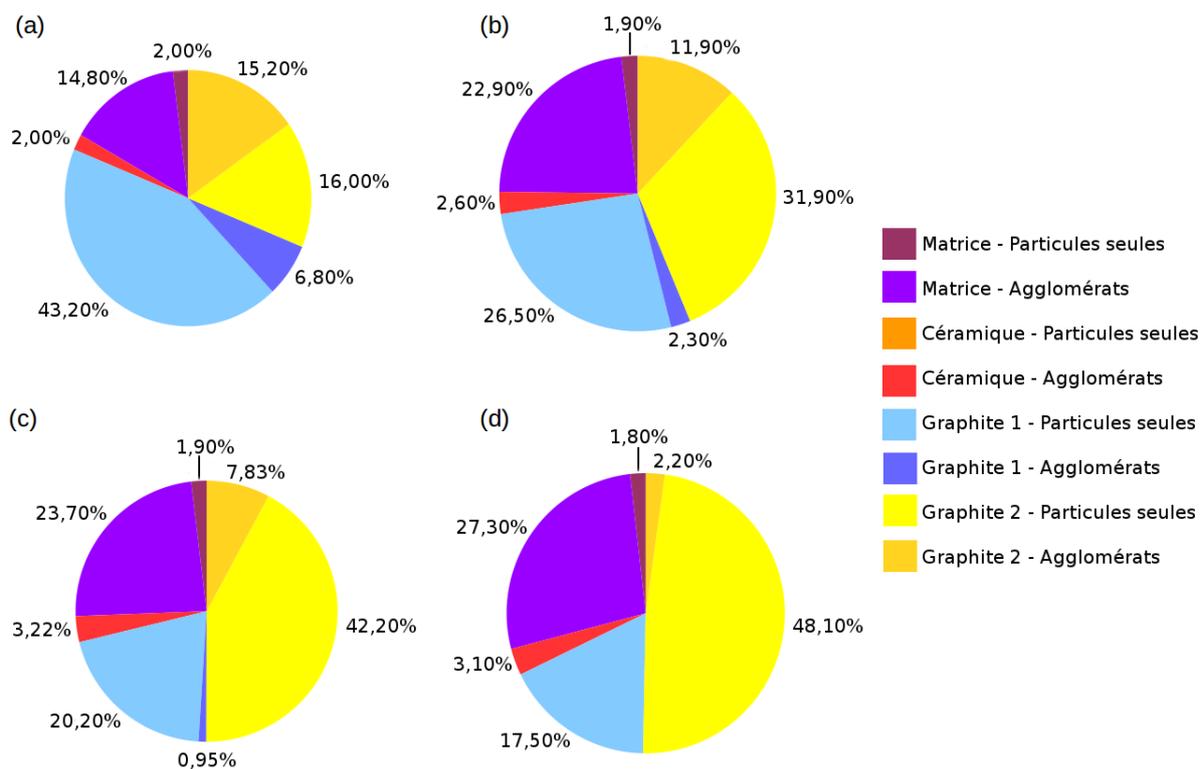


FIGURE 4.50 – Répartition des fragments sous forme d'agglomérats ou de particules isolées (pulvérulentes) pour (a)  $P = 0,24$  MPa, (b)  $P = 2,38$  MPa, (c)  $P = 7,14$  MPa et (d)  $P = 11,9$  MPa.

Des remarques similaires peuvent être fait lors des variations de vitesse (cf. fig. 4.51). Ici, les variations des proportions de matrice et de graphite ne varie pas de façon significative. Le graphite 2 se dégrade davantage avec la vitesse mais diminue un peu à 20 m/s, ce qui correspond à la diminution de la dégradation moyenne remarquée par rapport au cas  $V = 15$  m/s dans l'analyse globale.

Pour conclure, la graphite 2 et la matrice sont en plus forte proportion dans l'échantillon. Sous l'effet des sollicitations, ces deux constituants sont les plus susceptibles d'être arrachés au premier corps. Les particules de graphite 2 ont des liens cohésifs moins forts avec leurs proches voisins que celles de la matrice. Ce dernier se dégrade alors plus facilement en troisième corps. Et, sous l'effet des sollicitations, les fragments de graphite 2 se décomposent assez rapidement en leurs particules élémentaires. La matrice, bien qu'en plus forte proportion (dans l'échantillon initial) que le graphite 2, a des liens cohésifs plus fort avec ses proches voisins et se dégrade moins facilement en troisième corps. Mais plus l'effet des sollicitations est important et plus la matrice se détache des premiers corps. Toutefois, dans l'interface, la matrice reste principalement sous forme d'agglomérats.

Pour les deux autres constituants, ils sont en quantité moindre dans l'échantillon. La céramique qui possède des liens cohésifs très forts, ne se détache qu'en faible proportion du premier corps et même détachée ne se fragmente pas. Le graphite 1 est le constituant

qui se dégrade le plus. et, dans l'interface, se fragmente très vite. Cependant, si le graphite 1, bien que potentiellement plus dégradé que le graphite 2, est moins présent dans le troisième corps, est-ce dû à sa proportion moindre dans l'échantillon ou aux propriétés intrinsèques au graphite 2 lui conférant de meilleures propriétés de lubrification ?

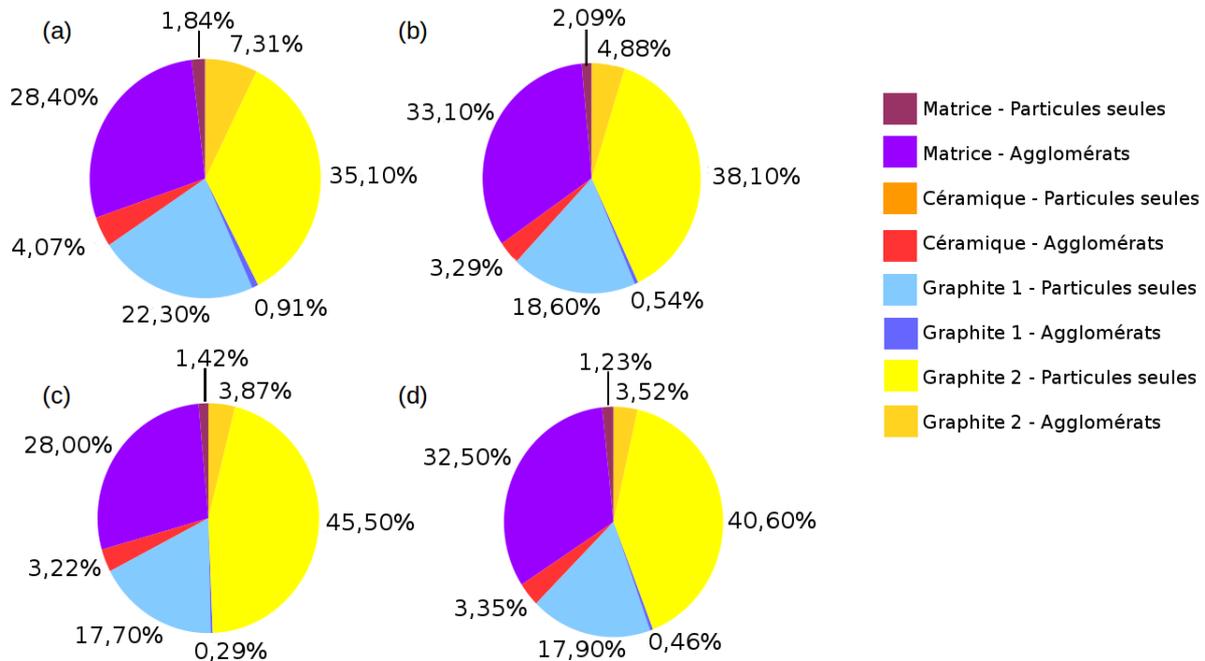


FIGURE 4.51 – Répartition des fragments sous formes d'agglomérats ou de particules isolées (pulvérulentes) pour (a)  $V = 5$  m/s, (b)  $V = 10$  m/s, (c)  $V = 15$  m/s et (d)  $V = 20$  m/s).

Malgré ces remarques, il ne faut pas omettre que, numériquement, toutes les particules se comportent de la même façon dans le troisième corps du fait qu'aucune propriété locale ne les différencie (telle que la cohésion). Le comportement observé dépend principalement des paramètres de la loi CZM et des propriétés intrinsèques aux constituants.

#### IV.4 Un troisième bilan

L'analyse numérique d'un matériau de freinage, bien que simplifié, permet de dégager les principales tendances mécano-thermiques se produisant lors du freinage. De même, l'impact des divers constituants sont mis en évidence. Et bien qu'un nombre de constituants plus important permettrait une plus grande pertinence des résultats, la complexité due au nombre plus conséquent d'interactions à prendre en compte s'avérerait trop élevée (avec les moyens actuels).

## V Discussion sur la dégradation des matériaux de freinage

Il a été remarqué, pour les cas homogènes, bi-constituants et multi-constituants, que pression, vitesse et cohésion influencent la dégradation des matériaux, de même que le comportement thermique au sein de ce dernier. Les résultats présentés dans le cas homogène sont relatifs aux tendances issues de la littérature. Les résultats des cas bi-constituants et multi-constituants reflètent des tendances similaires avec, de plus, une mise en évidence des variations des grandeurs globales dues aux constituants en présence. Et en effet, les influences locales se font ressentir sur les comportements globaux. C'est d'autant plus le cas lorsqu'un nombre conséquent de constituants est présent.

De même façon qu'au cours du chapitre 3, il y a une compétition entre les domaines physiques en jeu (mécanique, thermique) au niveau global ainsi qu'une compétition au niveau local (cohésion, proportion) (cf. fig. 4.52).

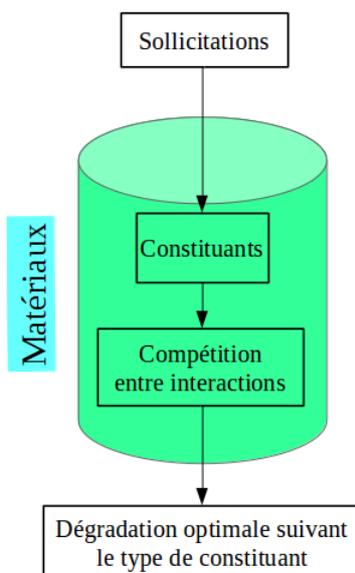


FIGURE 4.52 – Synthèse sur la dégradation des matériaux de freinage.

Bien que certains travaux se soient intéressés à l'usure de mélange cuivre/graphite [SU 15] [SU 15(2)] [SU 17] [KOVA 96] [KOVA 08] [OSTE 10] [OSTE 10] [TANG 08] ainsi qu'à l'usure de matériaux de freinage [COPI 00] [BULT 06] [SERR 14] [HENT 16] [BRUN 07], les travaux portant sur l'analyse du matériau de freinage à l'échelle locale (telles que les interactions entre constituants) n'ont pas été mis en évidence. Toutefois, les tendances des résultats présentées au cours de ce chapitre, c'est-à-dire les comportements globaux par influence des comportements locaux, sont en bonne adéquation avec les tendances expérimentales et numériques issues de la littérature.

Les tendances globales mesurées dépendent fortement des paramètres locaux (paramètres d'entrée du modèle numérique). Une connaissance plus fine de ces paramètres, au sein des matériaux réels, permettra d'affiner les résultats numériques avec une plus grande correspondance vis-à-vis de la réalité.

Suite à cette analyse, un intérêt peut être porté sur le circuit tribologique pour expliquer la dégradation des matériaux de freinage via les débits de matière. Numériquement, des débits cumulés sont déterminés comme le rapport entre une quantité de particules  $N_x$  relatif à un débit par le nombre total de particules initiales  $N_T$  (plus de détails sont donnés dans le chapitre 5). Les débits ont été représentés en figure 4.53, pour  $P = 11,9$  MPa et  $V = 25$  m/s.

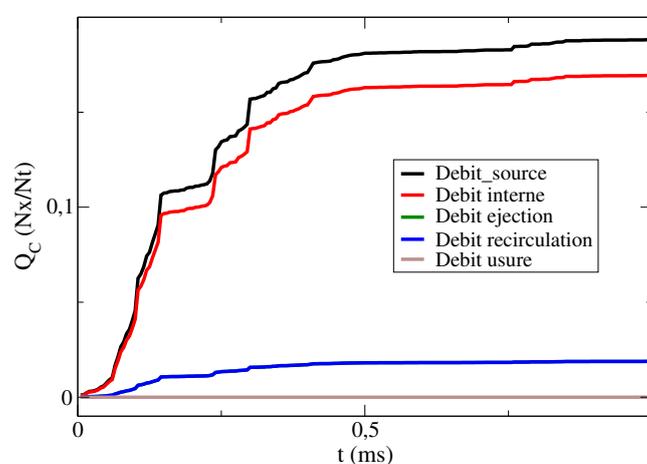


FIGURE 4.53 – Représentation des débits de matière pour  $P = 11,9$  MPa et  $V = 25$  m/s.

Sur cette représentation du circuit tribologique, le débit source a un comportement similaire à la dégradation. Quant au débit interne, il dépend des particules détachées du premier corps et donc du débit source.

Cependant, le circuit tribologique n'est pas encore complet. Pour cela, il est nécessaire de permettre à certaines particules d'être définitivement éjectées hors du contact. Cela nécessite de compléter le circuit tribologique avec le débit d'usure et de modifier les conditions numériques en conséquence. C'est ce qui est proposé dans le cadre du dernier chapitre.



# Chapitre 5

## Modèle d'usure pour les matériaux de freinage

### I Introduction de l'usure dans le modèle discret

Au cours des chapitres précédents, les simulations étaient effectuées sous conditions périodiques imposant une recirculation des particules et de la chaleur. Celles-ci avaient pour but d'analyser les phénomènes locaux liés à la dégradation des matériaux de freinage. L'effet des sollicitations et des paramètres locaux sur les phénomènes liés à la dégradation ont été mis en évidence. Toutefois, sans éjection définitive des particules (et donc sans débit d'usure), les phénomènes d'usure ne sont pas pris en compte.

Ce chapitre est centré sur la prise en compte de l'usure, par des critères adaptés, afin de modéliser un débit d'usure et de reconstituer la vie tribologique du contact. Il est en effet assez aisé, avec le modèle discret, de “compter” les particules et d'en déduire les différents débits du circuit tribologique. Toutefois, l'usure abordée numériquement au cours de ces travaux n'est pas l'usure “macro”, mesurée expérimentalement (perte de masse ou d'épaisseur du matériau). Il est ici question d'usure “locale”, vis-à-vis de la taille de l'échantillon numérique qui ne représente qu'une infime partie de l'interface de contact. Cela nécessite de s'interroger sur les critères permettant au modèle de “s'user”.

Au cours de ce chapitre, des critères d'éjection sont mis en place afin de générer un débit d'usure. Suite à cela, des analyses sont menées sur le modèle numérique basé sur la garniture G36S dans le but de comprendre l'impact de ce débit d'usure sur les phénomènes mis en évidence au cours des chapitres précédents.

## II Construction d'un modèle d'usure

### II.1 Conditions choisies pour la modélisation de l'usure

Jusqu'alors, le modèle numérique avait des conditions périodiques dans le sens de l'écoulement. Toutes particules sortant du contact par une frontière latérale étaient ré-introduites par la frontière latérale opposée, rendant le débit d'usure nul (cf. fig. 5.1).

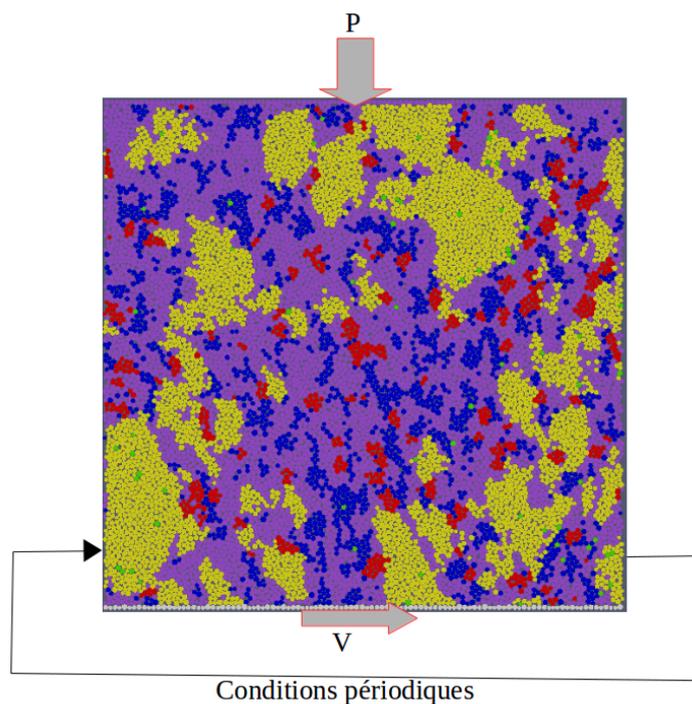


FIGURE 5.1 – Modèle numérique avec conditions périodiques.

Afin d'avoir un débit d'usure non nul, il pourrait paraître suffisant de retirer les conditions périodiques mais les particules de troisième corps seraient toutes éjectées hors du contact sans recirculation. Or, le but n'est pas de substituer un débit de recirculation exclusif par un débit d'usure exclusif mais de reconstituer le circuit tribologique complet. Pour cela, il s'avère nécessaire de modifier les conditions périodiques pour permettre uniquement à certaines particules de troisième corps d'être éjectées tout en permettant aux autres, qui ne sont pas influencées par ces conditions, d'être toujours dans un écoulement périodique.

L'objectif, ici, n'est pas de rechercher un modèle d'usure parfait mais plutôt d'appréhender simplement l'influence de l'éjection des particules sur les mesures globales. De nombreux critères peuvent sembler pertinents : critères géométriques (hauteur, dimension), critères de vitesse, critère d'interaction ( $\beta_i$ ) ou encore critère de cohésion, ... Sans oublier les nombreux critères liés aux conditions extérieures qu'il n'est pas possible de

prendre en compte numériquement. Certains critères d'usure ont été utilisés dans les travaux de Rivière [RIVI 15(2)] et ont inspiré ce travail.

Les particules dont les interactions sont rompues avec leurs proches voisines sont celles qui peuvent le plus facilement sortir du contact. C'est cette condition principale qui est imposée, c'est-à-dire faire disparaître du contact les particules dont les valeurs de  $\beta_i$  sont nulles. Ces particules sont qualifiées de *pulvérulentes*<sup>1</sup> dans la suite.

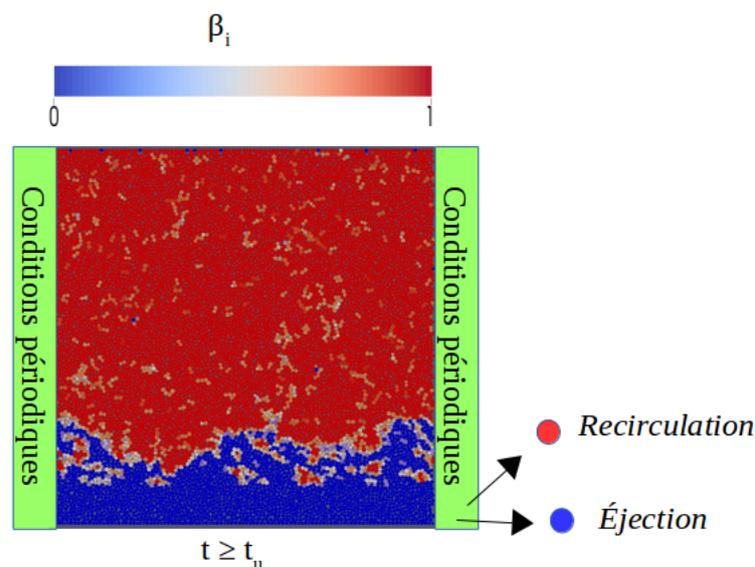


FIGURE 5.2 – Conditions d'usure appliquées au modèle discret.

De ce fait, pour modéliser l'usure, le processus suivant est réalisé. Une simulation est lancée jusqu'à atteindre le pas de temps  $t_u$  à partir duquel l'usure est activée. A  $t_u$ , un volume de troisième corps est déterminé. A partir de cet instant, deux types de simulation sont effectuées (cf. fig. 5.2) :

1. à  $t_u$ , disparition de toutes les particules de troisième corps dont la valeur de  $\beta_i$  est nulle (ce cas est défini comme l'usure instantanée) ;
2. à partir de  $t_u$ , toutes les particules franchissant la frontière périodique en aval du cisaillement et ayant un  $\beta_i$  nul sont éjectées du contact (ce cas est défini comme l'usure évolutive).

1. Le terme de pulvérulent est ici employé pour des particules se déplaçant dans l'interface sans lien cohésif avec leurs proches voisines. A contrario, les particules faisant partie d'agglomérats de troisième corps ont des liens cohésifs avec leur proches voisines à l'intérieur de ces agglomérats. Ces particules sont considérées comme cohésives. Le terme de cohésive est lié à la définition des paramètres d'interaction de la loi CZM. Attention à ne pas confondre avec la cohésion locale du troisième corps qui est donnée par la loi unilatérale cohésive et qui représente l'attraction entre particules au sein du milieu.

Ces deux cas peuvent s'apparenter à des phénomènes se produisant lors du freinage. Par exemple, il est possible de relier l'usure instantanée à la séparation des premiers corps entre deux freinages successifs (ouverture du contact) tandis que l'usure évolutive peut illustrer l'éjection des particules en cours de freinage.

Ces deux cas ainsi que le critère d'usure choisis sont non exhaustifs par rapport à la gamme de comportements possibles lors de l'usure. Toutefois, cela est suffisant pour donner des tendances empiriques de l'évolution du contact lors de l'éjection de particules.

## II.2 Méthodologie

Suite aux conditions appliquées sur le modèle, tous les débits sont maintenant pris en compte (cf. fig. 5.3) excepté le débit source externe ( $Q_s^e$ ). Ce dernier n'est pas pris en compte car il nécessiterait de modéliser les apports du milieu extérieur ce qui n'a pas été mis en œuvre actuellement du fait des différents éléments à appréhender (pollutions extérieures, réaction chimiques, ...).

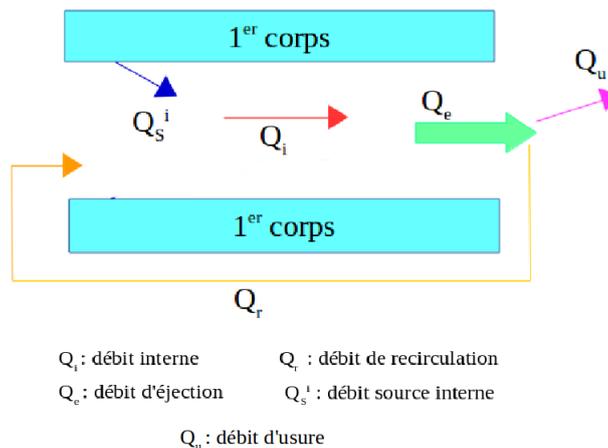


FIGURE 5.3 – Circuit tribologique complet.

Ces différents débits sont représentés comme étant le rapport entre le nombre de particules correspondant au débit considéré ( $N_x$ ) et le nombre total initial de particules du modèle ( $N_t$ ), à savoir  $N_x/N_t$ . Il s'agit en fait de débits cumulés permettant de représenter l'évolution temporelle des écoulements de matière. Ces débits cumulés, notés  $Q_C$ , seront nommés simplement "débits" dans la suite et leurs influences sur la dégradation globale  $\omega$ , le frottement moyen  $\bar{\mu}$ , ainsi que sur la température du milieu seront évaluées.

### III Différents types d'usure ...

#### III.1 ... et leurs impacts sur les débits de matière

Pour débiter cette série d'analyses, l'échantillon numérique est soumis à une pression de 11,9 MPa et une vitesse de 25 m/s, valeurs utilisées comme cas de référence dans le chapitre précédent. Les deux types de modèle d'usure sont testés et comparés au cas sans usure (cf. fig. 5.4).

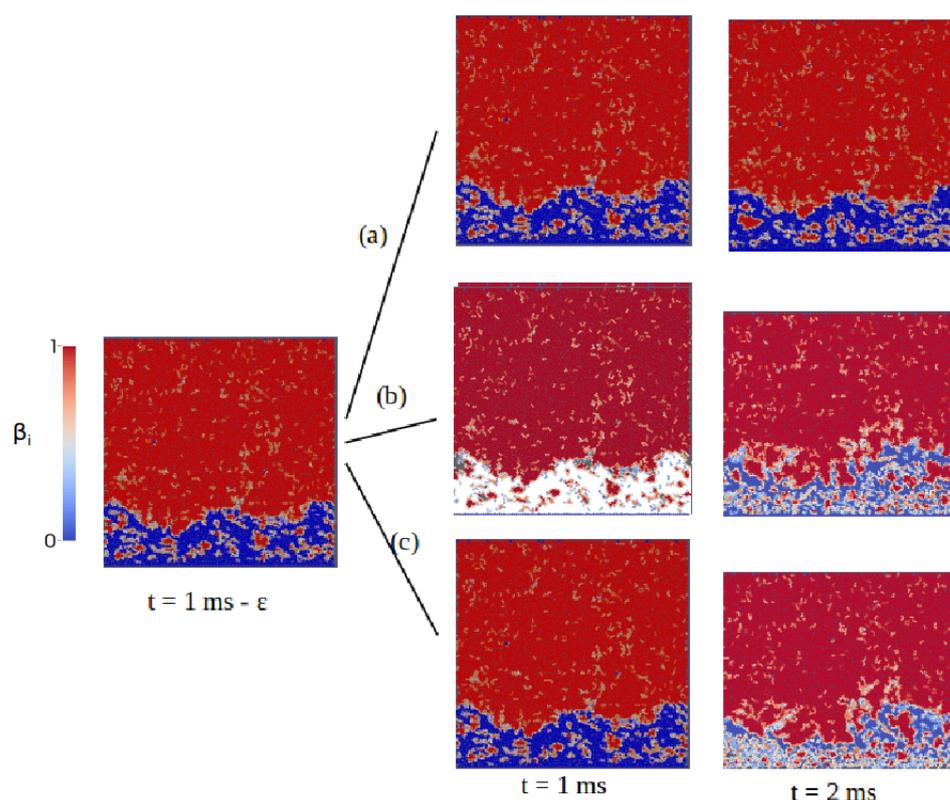


FIGURE 5.4 – Représentation des  $\beta_i$  pour les différentes phases de simulation : (a) cas sans usure, (b) usure instantanée, (c) usure évolutive.

Jusqu'à 1 ms, l'évolution des matériaux est similaire (pour chaque type d'usure). A partir de 1 ms et l'activation des conditions d'usure, ces évolutions divergent entre les cas sans usure, d'usure instantanée et d'usure évolutive. Au temps d'activation  $t_u$ , le troisième corps compte près de 1 460 particules ayant une valeur de  $\beta_i$  nulle. (soit 12,9 % de l'échantillon initial).

Dans le cas "sans usure", le volume de troisième corps reste stable jusqu'en fin de simulation.

Pour l'usure instantanée, toutes les particules de troisième corps dont les valeurs de  $\beta_i$  sont nulles sont éjectées du contact au temps  $t_u$  (12,9 % de l'échantillon initial).

Enfin pour l'usure évolutive, l'éjection des particules débute à  $t_u$ . A  $t = 1,7$  ms, une quantité de particules égale au cas de l'usure instantanée a été éjectée. En fin de simulation ( $t = 2,5$  ms), 17,5 % vis-à-vis de la proportion initiale a disparu du contact.

Pour ces trois cas, le circuit tribologique est reconstitué de façon à observer l'évolution temporelle des différents débits. Les débits représentés vérifient les conditions d'équilibre suivantes :

$$\begin{cases} Q_s = Q_i + Q_e \\ Q_e = Q_r + Q_u \end{cases} \quad (5.1)$$

La reconstitution du circuit tribologique est illustrée en figure 5.5.

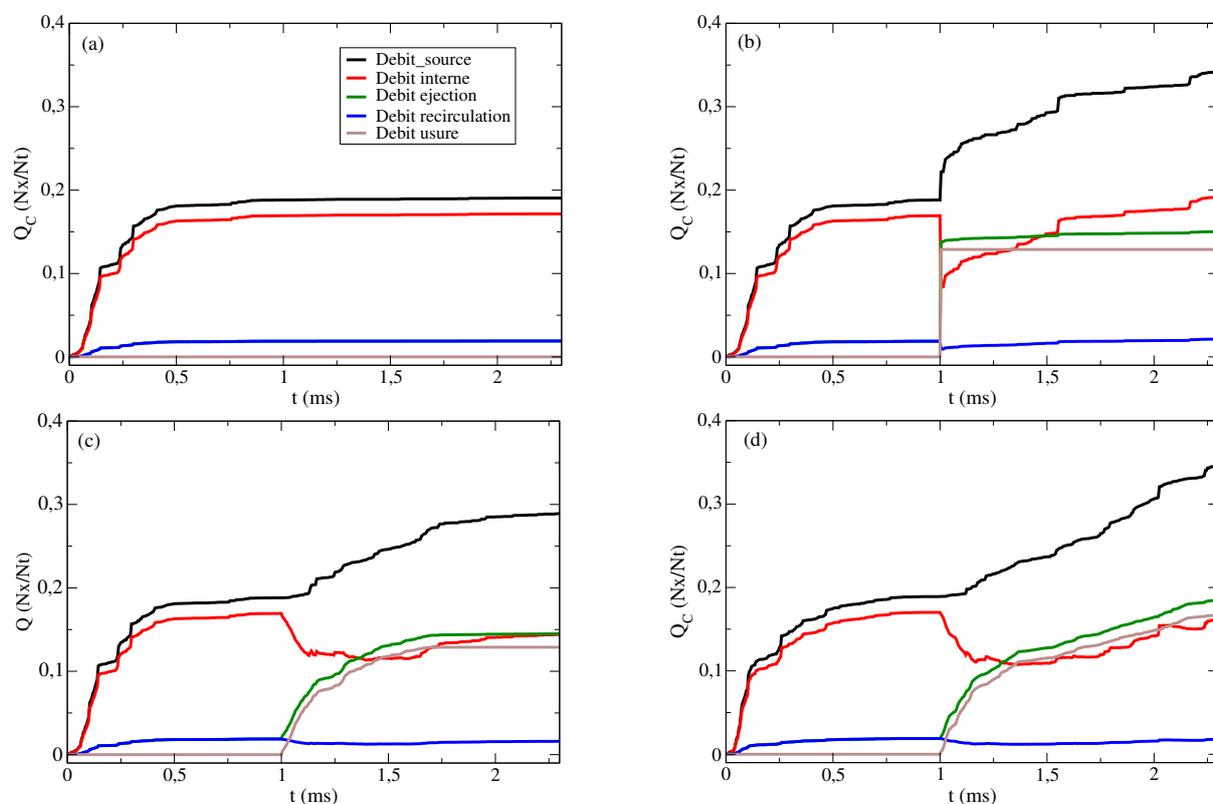


FIGURE 5.5 – Reconstruction du circuit tribologique pour une pression de 11,9 MPa et une vitesse de 25 m/s dans les cas (a) sans usure, (b) usure instantanée, (c) usure évolutive limitée et (d) usure évolutive continue.

Avant que l'usure ne soit activée (pour un temps inférieur à 1 ms), une couche de troisième corps est créée (cf. chapitre 4). Le débit source est directement lié à la génération de troisième corps sous l'effet des sollicitations. En l'absence de débit d'usure, les particules de troisième corps créées et circulant dans l'interface sont directement liées à cette création (débit interne proportionnel au débit source). Lorsque la simulation se poursuit sans débit d'usure (a), le troisième corps reste stable et évolue peu au cours du temps, la couche de troisième corps protégeant le matériau de la dégradation.

Dans le cas de l'usure instantanée (b), un débit d'usure apparaît instantanément à sa plus haute valeur. Suite à l'éjection des particules dont la valeur de  $\beta_i$  est nulle : le débit interne diminue brutalement. Un effet immédiat s'ensuit sur les variations des débits d'éjection et de recirculation. Au delà de 1 ms, l'échantillon, à nouveau soumis uniquement aux conditions périodiques, évolue de nouveau comme un contact fermé. Toutefois, suite à l'éjection d'une partie du troisième corps, une nouvelle phase de dégradation du premier corps se produit. Ceci met clairement en évidence le rôle protecteur du troisième corps vis à vis du premier corps. Puis, lorsqu'une couche suffisante de troisième corps est à nouveau créée (vers  $t = 1,7$  ms), le débit source se stabilise à nouveau provoquant ainsi la stabilisation du débit interne.

Dans le cas de l'usure évolutive, à partir de  $t_u$ , le débit d'usure apparaît suite à la disparition progressive des particules. Du fait de cette éjection, le débit interne diminue en conséquence. Toutefois, le débit source n'est pas immédiatement ré-activé, il y a un temps de latence avant l'augmentation de celui-ci. Ces résultats laissent supposer l'existence d'une proportion critique de troisième corps en deçà de laquelle l'équilibre mécanique assurant la protection du premier corps n'est plus assuré. Ensuite, le débit source augmente pour reconstituer une couche stable de troisième corps. Toutefois, la couche de troisième corps n'ayant pas entièrement disparue, le niveau de débit source n'est pas aussi élevé qu'avant l'activation. Vers  $t = 1,7$  ms, une quantité de troisième corps identique au cas de l'usure instantanée a été évacuée et le processus d'usure est stoppé. Ceci est illustré par le cas (c). Très rapidement, le débit source cesse d'augmenter pour les raisons conjointes d'une proportion de troisième corps suffisante et de l'arrêt des effets énergétiques liés à l'usure.

Une comparaison entre les cas (b) et (c) met en évidence une augmentation plus rapide et plus forte du débit source dans le cas de l'usure instantanée (pour une quantité de particules éjectées équivalente). Dans ce dernier cas, suite à l'éjection instantanée des particules, un niveau d'énergie plus élevé est requis pour revenir en situation d'équilibre.

Lorsque l'usure évolutive se poursuit au delà de  $t = 1,7$  ms (d), les particules continues alors de disparaître. Le débit source croît afin de contre-balancer le déséquilibre du système dû à l'usure. De même, le débit d'usure augmente de façon constante du fait de l'éjection progressive des particules.

Les analyses précédentes mettent en évidence un lien fort entre la dégradation et le type d'usure subi. Comment ces conditions sont-elles maintenant influencées par les sollicitations ?

### III.2 ... et leur dépendance aux différentes sollicitations

De même que dans le chapitre précédent, un certain nombre de couple  $(P, V)$ , traduits ici par leur produit, sont appliqués sur l'échantillon. L'évolution des débits de matière

ainsi que le lien avec la dégradation globale sont ainsi discutés pour les cas de l'usure instantanée et de l'usure évolutive.

Dans le cas de l'usure instantanée (cf. fig. 5.6), une plus grande proportion de particules est amenée à disparaître (b).

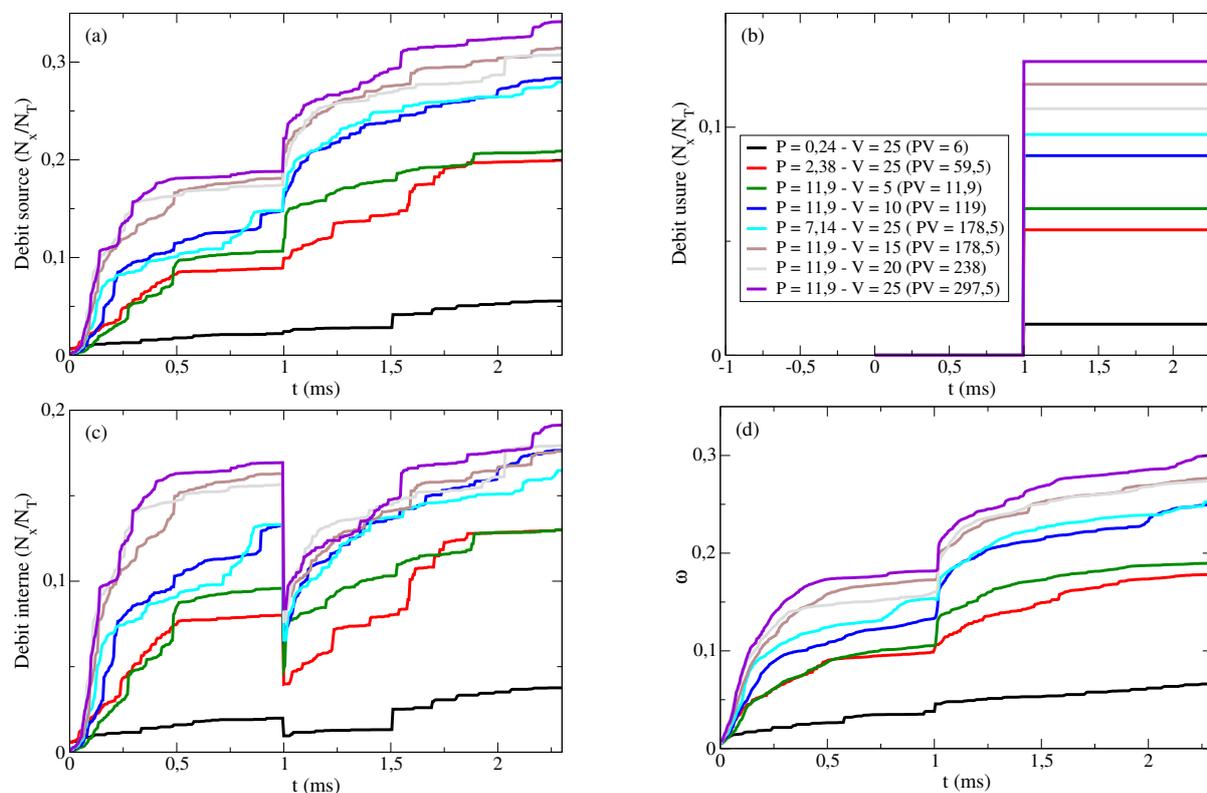


FIGURE 5.6 – Évolution temporelle dans le cas de l'usure instantanée (a) du débit source, (b) du débit d'usure, (c) du débit interne et (d) de la dégradation globale.

De ce fait, le débit source est bien plus sollicité pour reproduire une couche stable de troisième corps (a) et (c). En parallèle à cela, la dégradation est fortement corrélée au débit source (d). La figure 5.7 illustre cette disparition de particules et le retour à l'équilibre du troisième corps qui s'ensuit.

Ainsi, l'éjection des particules (et la dégradation du matériau) sont liés aux sollicitations pour des raisons simples. Celles-ci permettent de dégrader davantage de particules de premier corps en particules de troisième corps. De ce fait, davantage de particules ont une valeur de  $\beta_i$  nulle et répondent au critère d'éjection. De plus, durant la simulation, une vitesse élevée diminue le temps s'écoulant entre le détachement d'une particule (du premier corps) et son éjection suite au passage des frontières latérales. Ce qui signifie que pour une même durée de freinage, une vitesse plus élevée conduira à éjecter davantage de particules hors du contact que pour une vitesse faible.

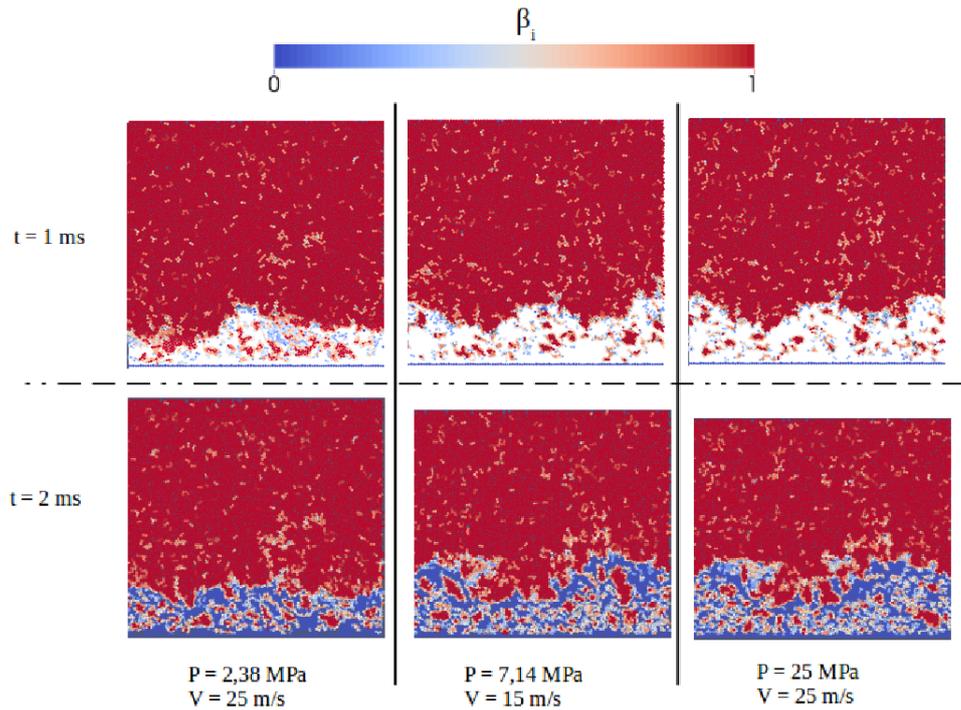


FIGURE 5.7 – Représentation numérique de l'endommagement du matériau pour diverses sollicitations - usure instantanée.

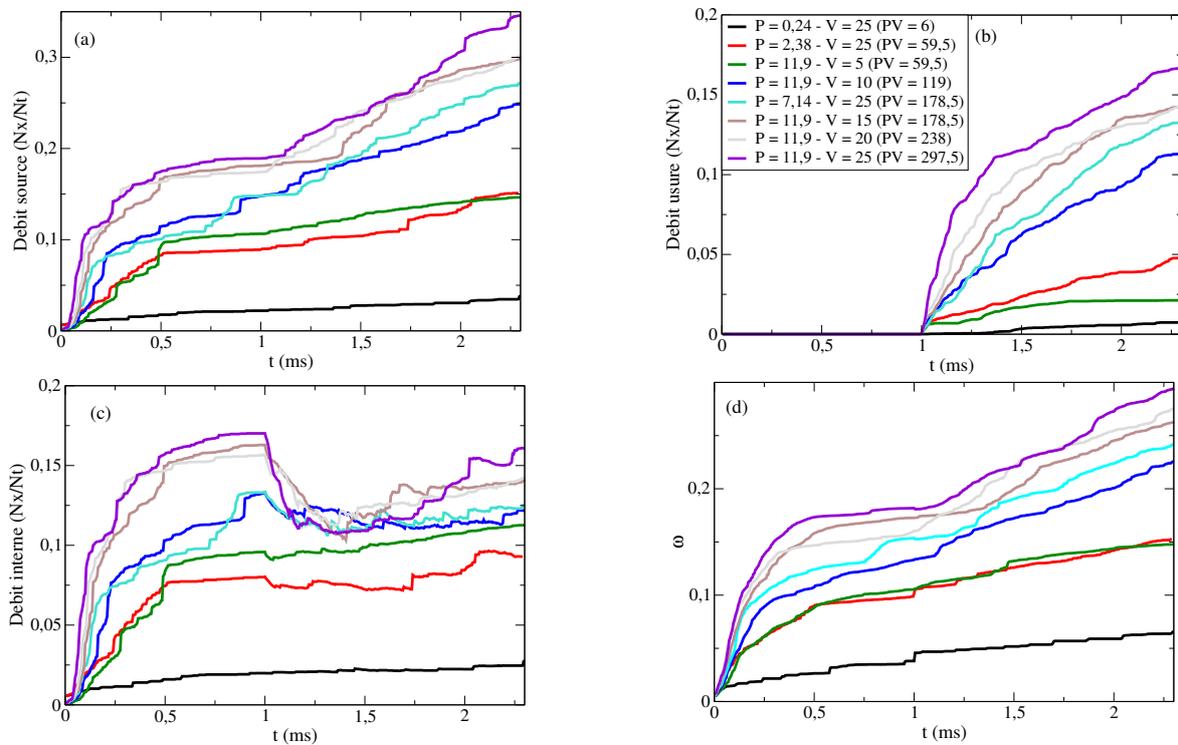


FIGURE 5.8 – Évolution temporelle dans le cas de l'usure évolutive (a) du débit source, (b) du débit d'usure, (c) du débit interne et (d) de la dégradation globale.

De même façon que pour l'usure instantanée, dans le cas de l'usure évolutive, l'évolution des débits sont observés (cf. fig. 5.8). Ici également, les particules sont éjectées plus rapidement avec de forts produits  $PV$  (b). Il s'ensuit un débit source (a) et une dégradation moyenne (d) plus importante avec ces sollicitations. Toutefois, l'évolution du débit interne (c) semble plus intéressante à observer. Alors que dans l'usure instantanée, le débit interne diminue subitement avec la disparition d'une partie du troisième corps et ré augmente dans la suite, les tendances sont différentes dans le cas de l'usure évolutive.

Comme énoncé précédemment, le débit interne diminue avec l'éjection des particules puis, en dessous d'une proportion critique de particules de troisième corps, le débit source est ré-activé ce qui provoque la ré-augmentation du débit interne (pour repeupler l'interface jusqu'à atteindre une position d'équilibre). La courbe du débit interne forme alors une forme de "creux", avec la plus haute sollicitation, qui décroît avec la diminution du produit  $PV$ . La notion de régimes d'usure a été abordée au cours du chapitre 1 signifiant que l'usure globale pouvait être classée suivant le niveau d'usure subie par le matériau [LEWI 04]. Dans cet échantillon numérique qui reste une approximation local du matériau réel, des régimes d'usure peuvent être mis en évidence suivant ce seuil critique qui est d'autant plus long à atteindre que l'énergie des sollicitations est importante.

Au premier abord, il semble que pour un produit  $PV$  important, les particules sont plus facilement éjectées du contact et la proportion du débit interne (et donc du troisième corps) diminue d'autant plus brutalement, une période de latence est alors nécessaire avant la ré-activation du débit source. Le tableau 5.1 recense la proportion de troisième corps lors de l'activation de l'usure ( $t = 1$  ms) et de la ré-activation du débit source ( $t > 1$  ms).

Sollicitations	Proportion de troisième corps à l'activation de l'usure	Proportion de troisième corps à la ré-activation du débit source
$P;V = (0,24;25)$	2,2 %	2,18 %
$P;V = (2,38;25)$	8,8 %	8,2 %
$P;V = (11,9;5)$	10,5 %	10 %
$P;V = (11,9;10)$	14,7 %	13,2 %
$P;V = (7,14;25)$	14,7 %	12,4 %
$P;V = (11,9;15)$	17,8 %	12,4 %
$P;V = (11,9;20)$	17,2 %	13,7 %
$P;V = (11,9;25)$	18,9 %	13,6 %

Tableau 5.1 – Proportion du troisième corps avant activation de l'usure et après ré-activation du débit source

La différence entre les deux proportions est d'autant plus grandes que les sollicitations sont grandes. C'est ici que peuvent être mis en évidence des régimes d'usure (par rapport à l'augmentation de la proportion critique à laquelle le débit source ré-augmente).

Suite à cette analyse numérique, plusieurs cas peuvent se présenter. D'abord des régimes "faibles" pour  $PV = 6$  et  $PV = 59,5$ . Pour ceux-ci, l'usure provoque une faible éjection des particules, le débit interne diminue peu et le matériau est très peu dégradé pour revenir à un état d'équilibre. Puis des régimes modérés pour  $PV = 119$  et  $PV = 178,5$ ; l'éjection plus importante entraîne un débit source plus important mais qui ne modifie pas d'une façon très importante l'évolution temporelle du débit interne. Enfin, il y a un régime plus fort pour  $PV = 238$  et  $PV = 297,5$  pour lequel l'éjection brutale des particules entraîne un déséquilibre au sein du débit interne (présence d'un "creux"), il s'ensuit alors une forte dégradation du matériau.

Ces déséquilibres proviennent d'un comportement mécanique, ce dernier étant à l'origine d'un comportement thermique. La partie suivante concerne alors les comportements mécano-thermiques au sein de l'échantillon pour la plus forte sollicitation ( $P = 11,9$  MPa et  $V = 25$  m/s) afin d'apporter des éléments de réponse à ces déséquilibres (qui dépendent également du type d'usure).

### III.3 ... et leur comportement mécano-thermique

La reconstitution des débits de matière a illustré l'importance du critère d'éjection mais aussi celui des sollicitations auxquelles le contact est soumis. L'un des points essentiels qui a été soulevé est l'existence d'une proportion du troisième corps permettant un équilibre entre premier et troisième corps (le débit source se réactive en deçà d'une certaine proportion).

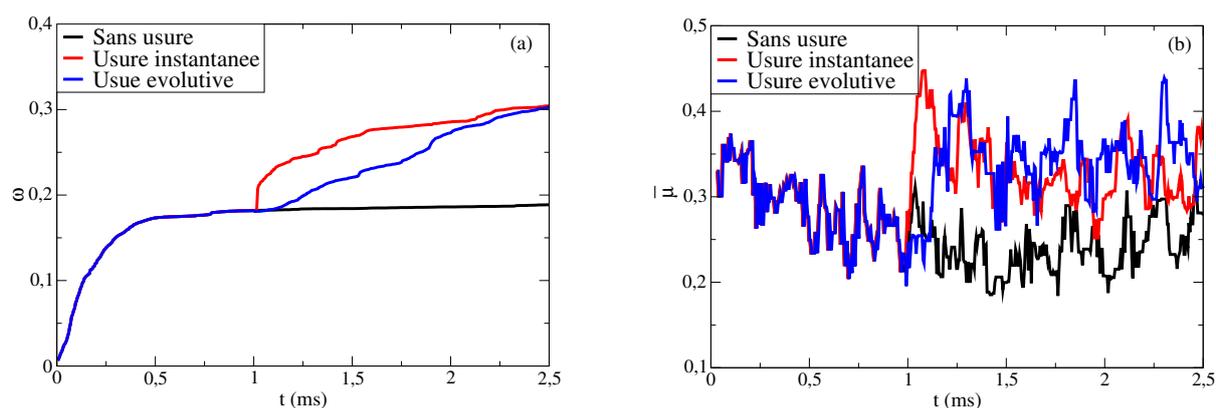


FIGURE 5.9 – Dégradation de la garniture (a) et frottement global (b) pour différentes usures.

En comparant la dégradation globale pour chaque type d'usure (cf. fig. 5.9 (a)), il paraît certain qu'un nombre important de particules éjectées à un instant  $t$  entraîne une dégradation plus élevée du matériau. Pour compenser cette compétition entre proportion de troisième corps et débit source, le frottement moyen s'élève mais cherche une nouvelle situation d'équilibre optimale pour le système (cf. fig. 5.9 (b)).

Les effets mécaniques tels que le frottement et la dégradation peuvent provoquer des élévations de température très importantes qui peuvent détériorer les matériaux de freinage [COPI 00]. Alors qu'il pourrait être attendu une température plus élevée au sein d'un contact fermé, cette dernière est plus importante en présence de débit d'usure, du fait du frottement plus important (cf. fig. 5.10).

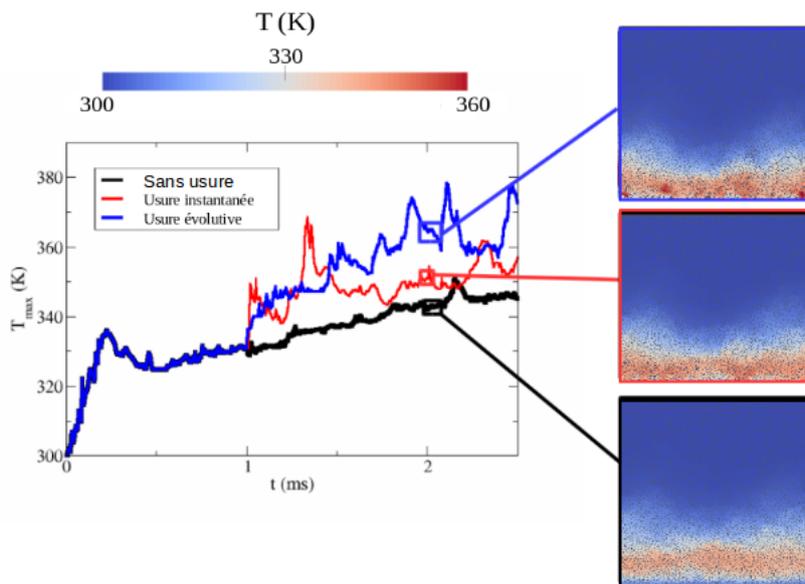


FIGURE 5.10 – Température maximale pour différents types d'usure.

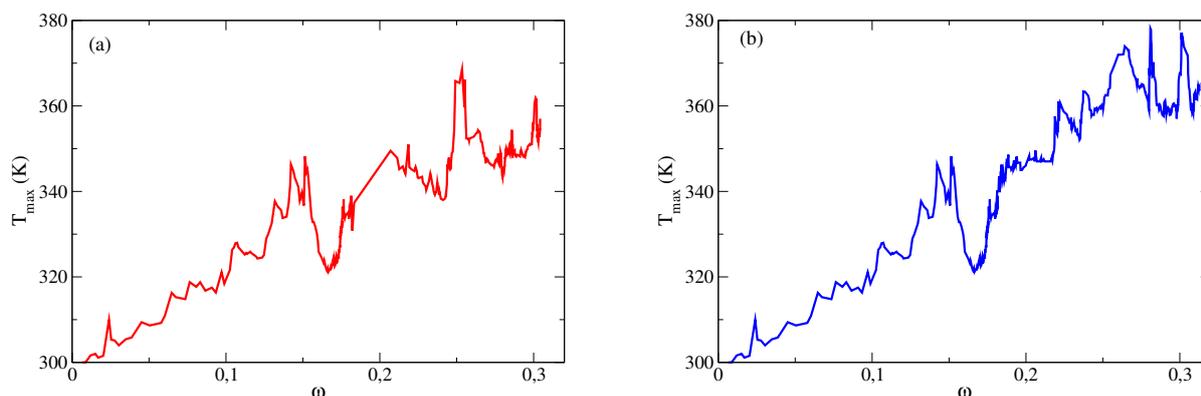


FIGURE 5.11 – Évolution de la température maximale suivant la dégradation pour (a) l'usure instantanée et (b) l'usure évolutive.

La chaleur n'est pas évacuée du contact de façon optimale, elle croît en effet avec le niveau de particules éjectées. Deux hypothèses peuvent alors être avancées : cet effet thermique est lié à l'éjection des particules du contact et/ou le critère d'usure choisi n'est pas le plus adapté pour une meilleure évacuation de la chaleur.

Lors du chapitre précédent, une corrélation a été faite quant à la relation entre la température et la dégradation globale. Ce constat est à nouveau fait ici en figure 5.11 et

bien que des comportements similaires soit observés dans les cas instantanés et évolutifs, de plus hautes températures (pour une même valeur de  $\omega$ ) sont atteintes dans le cas de l'usure évolutive. Dans l'instant qui précède l'activation de l'usure,  $\omega$  atteignait une valeur de 0,15 environ. Lors de l'activation de l'usure, l'éjection de nombreuses particules de troisième corps dont la température locale pouvait être élevée fait diminuer la température maximale au sein de l'échantillon.

## IV Rôle des constituants pour les différents types d'usure

Au cours du chapitre 4, le rôle des constituants dans la dégradation des matériaux a été discuté. Ici encore, il est légitime de s'interroger sur le rôle et l'importance des constituants dans l'évolution du matériau lorsque l'usure est activée. Bien sûr, du fait de la définition même du critère d'usure, il est vraisemblable que les particules de graphite (1 et 2), dont la dégradation en constituants élémentaires est plus importante, soit éjectées en priorité. Cependant, cette analyse permet d'appréhender le rôle des constituants dans les phénomènes mécano-thermiques se produisant à l'interface. De même que précédemment, l'échantillon est toujours soumis à une pression de 11,9 MPa et à une vitesse de 25 m/s.

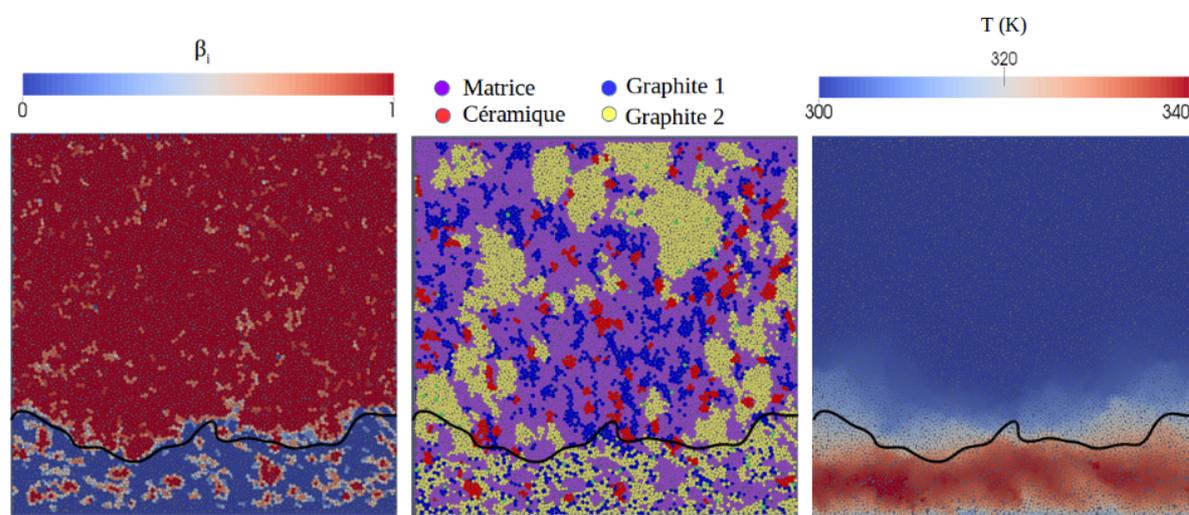


FIGURE 5.12 – Évolution du matériau à 1 ms (avant usure).

La figure 5.12 illustre les comportements mécano-thermiques de l'échantillon à 1 ms (cf. chapitre 4).

Avant activation de l'usure, le troisième corps est assez hétérogène et est constitué plus de particules pulvérulentes que d'agglomérats. l'élévation de température n'est pas

homogène et révèle des concentrations thermiques différentes selon le type de constituants ou du type de fragment de troisième corps. Dans la suite, l'impact du débit d'usure est discuté dans le cas de l'usure instantanée et dans le cas de l'usure évolutive par rapport aux constituants en présence.

## IV.1 Cas de l'usure instantanée

Le cas de l'usure instantanée est traité au cours de cette partie. Lorsque les particules disparaissent du contact, à  $t = 1$  ms (cf. fig. 5.13), toutes les particules pulvérulentes ont été éjectées hors de l'interface.

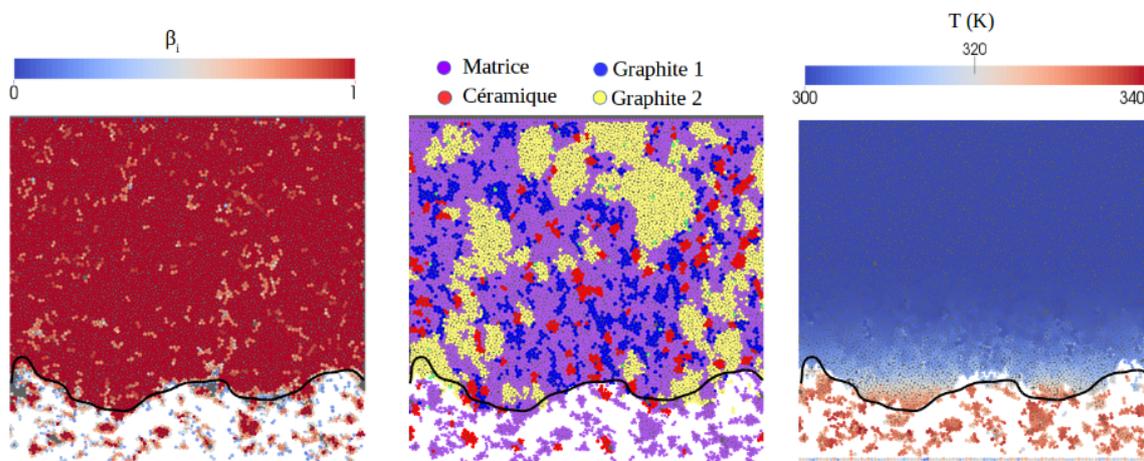


FIGURE 5.13 – Évolution du matériau à 1 ms (usure instantanée).

Ceci est directement lié au critère d'usure choisi, visant à la disparition de particules ayant une valeur de  $\beta_i$  nulle. La microstructure du matériau montre que toutes les particules de graphite 1 et pratiquement toutes les particules de graphite 2 ont été éjectées. Il avait été montré, dans le chapitre 4, que le graphite 1 apparaît très facilement à l'état pulvérulent du fait de la faible énergie nécessaire pour rompre les liaisons entre une particule de graphite 1 et ses proches voisins. Quant à l'effet thermique, les concentrations correspondent essentiellement à la matrice et à la céramique.

Plus tard dans la simulation, à 1,5 ms (et juste après ré-activation du débit source) (cf. fig. 5.14), le troisième corps est reconstitué de particules pulvérulentes avec ré-apparition, dans l'interface, de graphites.

Il n'y a en effet plus d'éjection de particules et les graphites se dégradent à nouveau sans disparition de ces derniers. La température (qui correspond davantage aux agglomérats de matrice et céramique) est plus élevée qu'avant activation de l'usure. Puis, cette dernière diminue telle que l'illustre la figure 5.15 (2 ms).

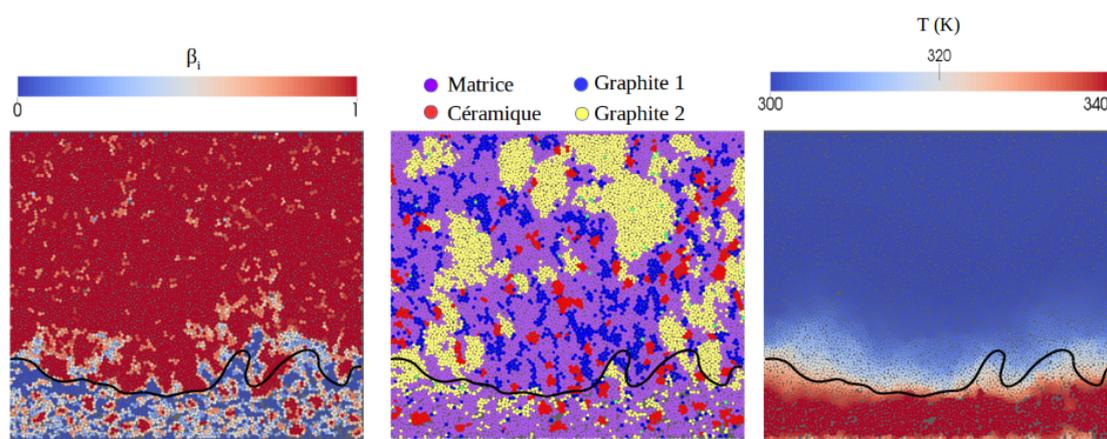


FIGURE 5.14 – Évolution du matériau à 1,5 ms (usure instantanée).

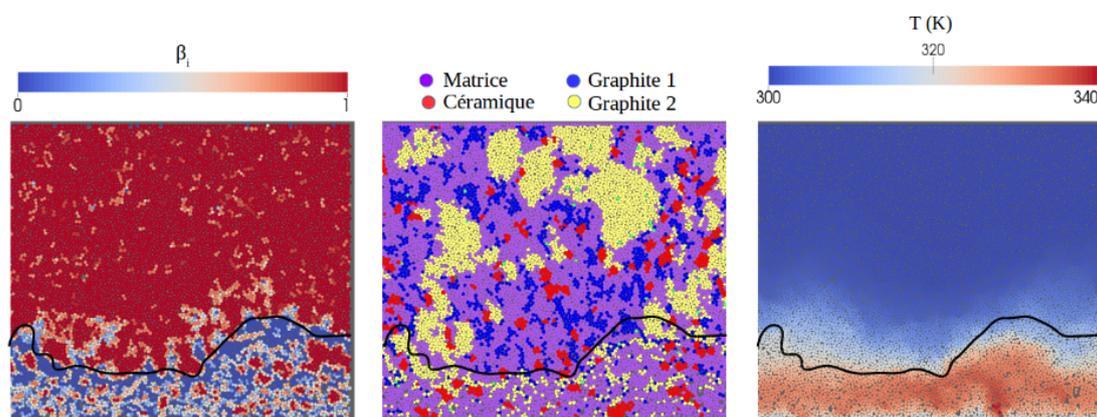


FIGURE 5.15 – Évolution du matériau à 2 ms (usure instantanée).

A cet instant (2 ms), le troisième corps s'est enrichi de graphites et de particules pulvérulentes. Cette diminution de température vient-elle d'un équilibre retrouvé pour le contact ou du fait que les particules pulvérulentes permettent une meilleure évacuation de la chaleur? Afin de répondre à ces interrogations, les évolutions temporelles de la dégradation (cf. fig. 5.16) et de la température maximale (cf. fig. 5.17) sont discutées.

Tandis que la température globale augmente avec la dégradation (cf. fig. 5.11), il n'y a pas de différence majeure de température entre les différents constituants. Toutefois la température inhérente au graphite 1 est légèrement inférieure à celle des autres constituants dans la phase d'usure. Ces particules qui sont principalement à l'état pulvérulent permettent de dissiper davantage la chaleur dans le matériau tandis que les agglomérats (céramique) l'emmagasine davantage. Cela peut être expliqué par l'énergie nécessaire afin de briser les liaisons avec les proches voisins qui est plus élevée au sein des agglomérats et qui produit alors plus de chaleur.

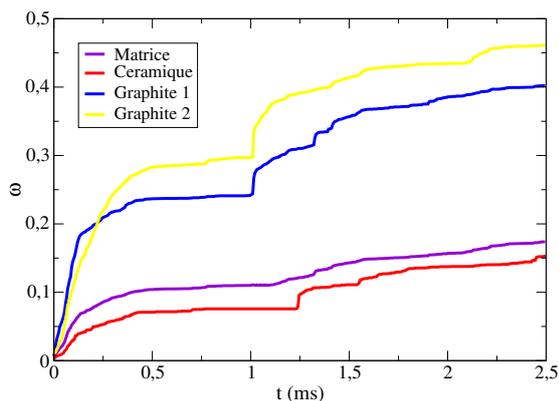


FIGURE 5.16 – Évolution de la dégradation suivant les constituants dans le cas de l'usure instantanée.

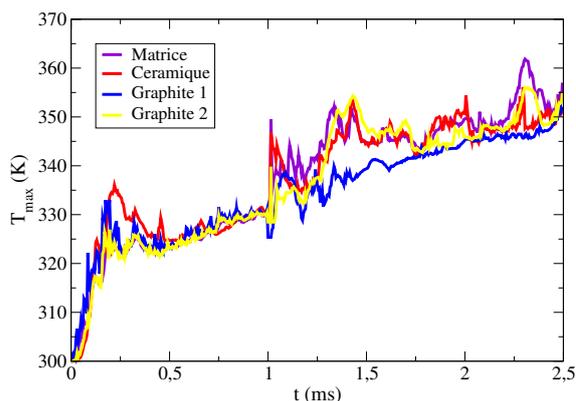


FIGURE 5.17 – Évolution de la température suivant les constituants dans le cas de l'usure instantanée.

Toutefois, certains points de questionnement sont manquants. En effet, malgré le niveau de dégradation et son influence sur la température, cela n'évoque pas l'état de décomposition des fragments au sein de l'interface (et l'équilibre mécanique de celle-ci). Pour cela, la proportion de chaque constituant dans le troisième corps est représenté en figure 5.18. Cela illustre davantage la diminution de graphite lors de l'ouverture du contact. Matrice et céramique devienne alors majoritaire dans ce dernier. Ce type d'analyse permet d'avoir une vue globale sur la composition du troisième corps. La modification des proportions sont dues à la dégradation du premier corps mais aussi à l'éjection hors du contact.

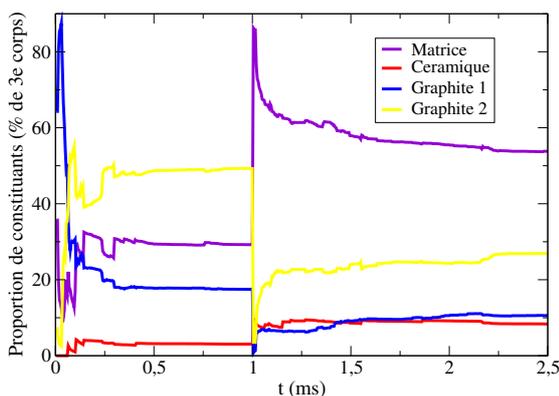


FIGURE 5.18 – Proportion des constituants au sein troisième corps dans le cas de l'usure instantanée.

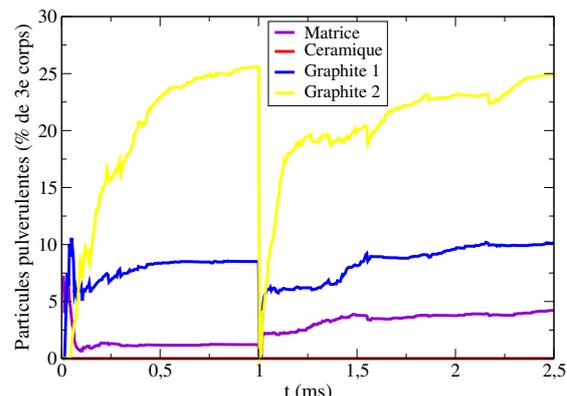


FIGURE 5.19 – Proportion de particules pulvérulentes au sein du troisième corps dans le cas de l'usure instantanée.

Afin d'avoir une vue plus fiable des particules susceptibles d'être éjectées (cf. fig. 5.19), une représentation est faite de la proportion de particules pulvérulentes. Avant l'ouverture du contact, le troisième corps est composé d'environ 35 % de particules pulvérulentes à

hauteur de 25 % de graphite 2, de 8 % de graphite 1 et de 2 % de matrice. Toutes ces particules sont éjectées à l'ouverture du contact. Ce dernier se rééquilibre par la suite mais la proportion de particules pulvérulentes de graphite 2 continue de croître davantage que celle du graphite 1 et de la matrice. Un point important à signifier ici est la correspondance entre un taux de particules élevé lors de l'ouverture du contact et la tendance plus grande à recréer des particules pulvérulentes.

## IV.2 Cas de l'usure évolutive

Dans la suite, c'est l'usure évolutive qui est observée au niveau des constituants. Avant l'ouverture du contact, le système est dans l'état illustré par la figure 5.12 présentée dans la section précédente.

A 1,5 ms (cf. fig. 5.20), peu après la ré-activation du débit source, le troisième corps est fortement modifié.

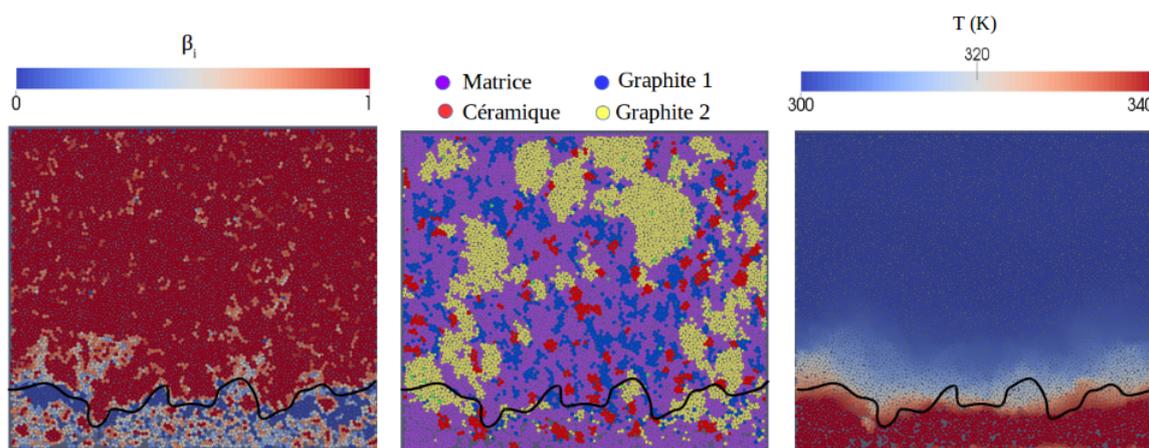


FIGURE 5.20 – Évolution du matériau à 1,5 ms (usure évolutive).

En effet, les graphites ont disparu en grande proportion et l'interface se trouve être essentiellement constituée de matrice et de céramique. Et alors qu'il y a beaucoup moins de particules pulvérulentes, la chaleur s'est élevée. Par ailleurs, la concentration de celle-ci est beaucoup moins hétérogène du fait d'une interface dont deux des constituants sont maintenant majoritaires.

A 2 ms (cf. fig. 5.21), afin de tendre vers un nouvel équilibre du système, le matériau est davantage dégradé suite à la ré-activation du débit source permettant d'augmenter la dimension du troisième corps et d'y apporter de nouveaux éléments. En effet, les graphites repeuplent l'interface bien que ces derniers continuent d'être éjectés, pour la plupart, suite au critère d'usure. Quant à la température, elle est toujours plus intense malgré la ré-apparition de graphites.

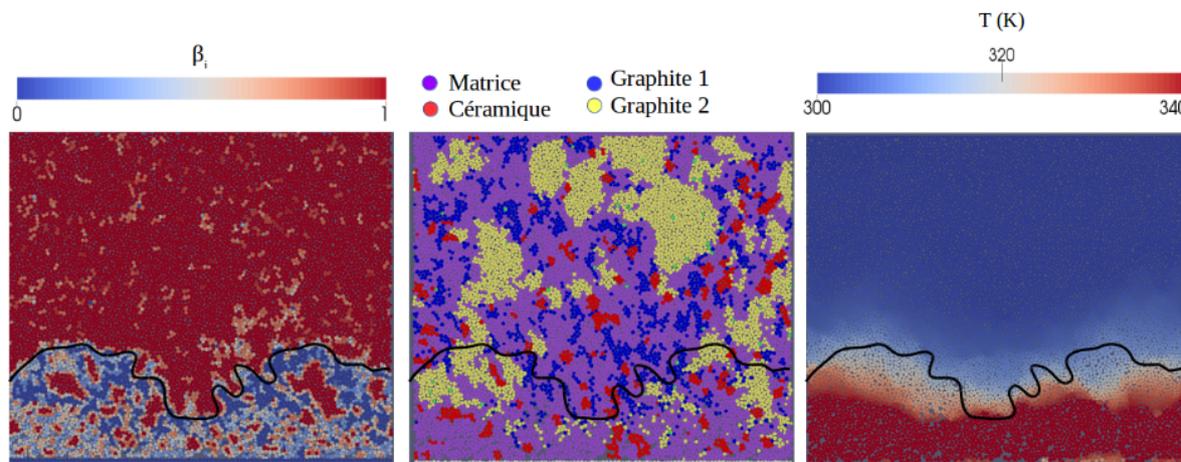


FIGURE 5.21 – Évolution du matériau à 2 ms (usure évolutive).

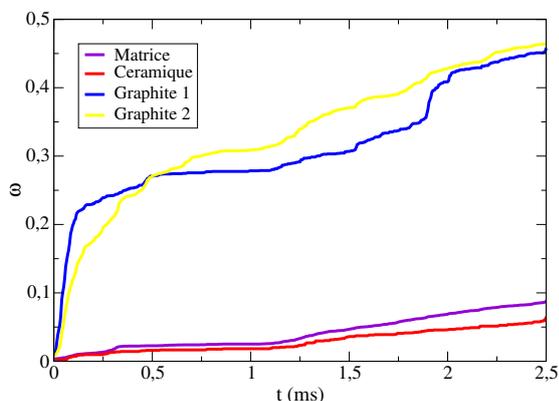


FIGURE 5.22 – Évolution de la dégradation suivant les constituants dans le cas de l'usure évolutive.

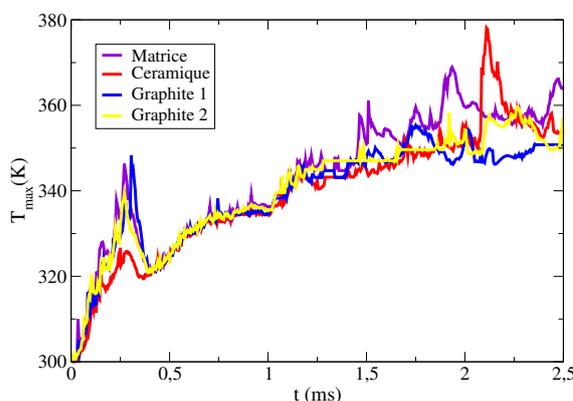


FIGURE 5.23 – Évolution de la température suivant les constituants dans le cas de l'usure évolutive.

Comme dans le cas de l'usure instantanée, la dégradation globale (cf. fig. 5.22) ainsi que les températures (cf. fig. 5.23) correspondantes sont analysées. Alors que pour l'usure instantanée,  $\omega$  augmente brutalement lors de l'ouverture du contact, ici,  $\omega$  évolue plus progressivement. du fait d'un débit d'usure moins "brutal". La température, quant à elle, est plus homogène au sein des constituants malgré quelques fluctuations. La dissipation thermique corrélée aux particules pulvérulentes ne suffit plus, ici, à expliquer les comportements thermiques. L'énergie issue de l'éjection des particules produisent une élévation de température conséquente au sein de l'interface.

Dans le cadre de l'usure évolutive, la proportion de constituants au sein du troisième corps (cf. fig. 5.24) évolue rapidement entre l'activation de l'usure et la ré-activation du débit source telle une phase de rodage après laquelle le système se ré-équilibre progressivement. Toutefois, les particules de graphite 2 sont plus éjectées que renouvelées au sein du

troisième corps (cf. fig. 5.25). Les constituants présents dans l'interface s'équilibrent vers des proportions pour lesquelles les particules éjectées hors du contact sont proportionnelles aux particules issues de la dégradation du premier corps.

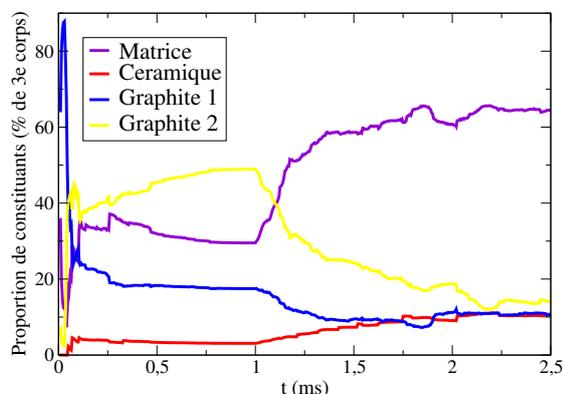


FIGURE 5.24 – Proportion des constituants au sein du troisième corps dans le cas de l'usure évolutive.

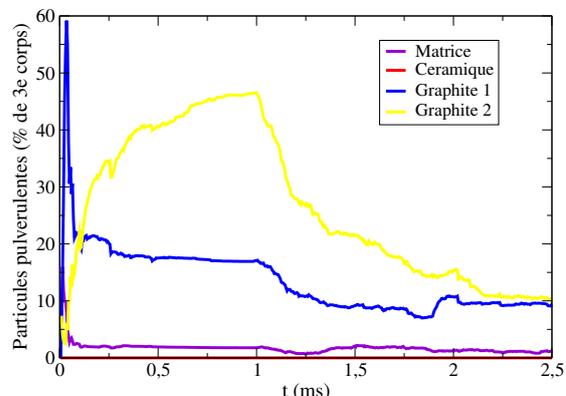


FIGURE 5.25 – Proportion de particules pulvérulentes au sein du troisième corps dans le cas de l'usure évolutive.

Ainsi, ces résultats restent en corrélation avec les observations précédentes en lien avec les tendances des divers constituants au cours de la simulation tels que les paramètres locaux ou le critère d'usure qui orientent fortement l'issue de ces analyses.

## V Discussion sur le modèle d'usure

Le modèle présenté ici est basé sur la vision tribologique de Godet [GODE 84] et Berthier [BERT 88].

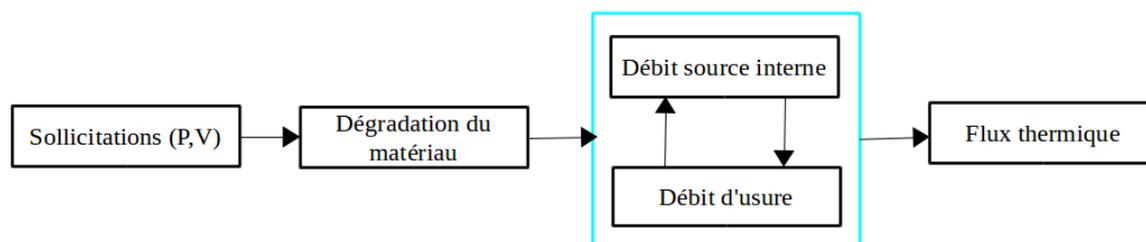


FIGURE 5.26 – Scénario de la vie du contact représenté au cours de ce chapitre.

Les corps en contact, sous l'effet des sollicitations, provoquent la création de troisième corps (débit source). Suite aux conditions d'usure choisies, une partie des particules de troisième corps est éjectée hors de l'interface. Une compétition entre débit source et débit d'usure permet à l'interface de tendre vers un équilibre afin d'assurer une protection optimale du matériau. Puis, les comportements mécaniques vont engendrer des comportements thermiques (cf. fig. 5.26).

En ce qui concerne la compétition entre débit source et débit d'usure, une hypothèse peut être suggérée à partir des équations liant les débits.

$$\begin{cases} Q_s = Q_i + Q_e \\ Q_e = Q_r + Q_u \end{cases} \quad (5.2)$$

Du système 5.2, le lien entre débit source et débit d'usure est donné par :

$$Q_s = Q_i + Q_r + Q_u \quad (5.3)$$

Or,  $Q_i$  est une fonction du débit source et  $Q_r$ , qui est lié au débit interne et donc au débit source, est également une fonction du débit source, l'équation 5.3 devient :

$$Q_s = f(Q_s) + Q_u \quad (5.4)$$

L'équation 5.4 illustre ce lien direct entre débit source et débit d'usure. Toutefois, d'autres paramètres sont peut-être à prendre en compte pour la réalité de cette loi.

Et c'est pour cela qu'une attention particulière doit être portée sur la dégradation du matériau qui dépend des paramètres locaux définis par l'utilisateur mais également sur les débits de matière corrélés aux critères d'usure définis en amont des simulations.

Cette vision est en effet limitée car, comme énoncé au début de ce chapitre, le critère d'usure choisi ne reflète pas la réalité dans le sens où bien d'autres critères devraient être pris en compte pour tendre vers une évolution tribologique réelle. Cependant, ce modèle présente des évolutions cohérentes avec les observations expérimentales [COPI 00]. Ainsi, numériquement, quels critères pourraient enrichir le modèle ?

Afin d'être plus cohérent avec la réalité d'un contact, la prise en compte de multiples critères pourrait être envisagée, ce qui peut alors devenir trop complexe d'un point de vue numérique. Ces critères peuvent être basés sur la vitesse (des particules ou des agglomérats), sur la hauteur (effets de bord), sur la cohésion de troisième corps ou encore sur la dimension des fragments. Et cette liste est loin d'être exhaustive.

Mais, outre les critères d'usure à enrichir, l'effet de la température sur la dégradation des matériaux doit être inclus dans le modèle<sup>2</sup>. C'est en effet l'un des points manquants, et souvent rapportée dans la littérature que la température est corrélée à l'usure des matériaux.

---

2. Pour rappel, ce modèle numérique ne considère pas la rétro-action de la température sur les aspects mécaniques.



# Conclusion

Les travaux présentés dans ce mémoire ont pour objectifs de comprendre l'impact de l'usure du freinage ferroviaire à l'échelle locale, par une approche multi-physique, sur l'échelle globale. Les matériaux de freinage étudiés (semelles de frein et garnitures) se dégradent par action mécanique du matériau de freinage sur la roue ou sur le disque de frein. Deux phénomènes doivent être envisagés, l'impact direct de l'usure par action mécanique mais aussi l'impact indirect de l'usure qui provoque un problème de sécurité majeur dû à la localisation des trains (shuntage) suite à la contamination du contact roue-rail. Afin d'étudier les phénomènes se déroulant au sein des divers contacts et conduisant à l'usure et à ses conséquences, l'analyse est menée d'un point de vue tribologique. Les contacts peuvent être analysés comme des modèles à trois corps et les phénomènes tribologiques peuvent être appréhendés par le circuit tribologique. Le problème tribologique est, de plus, multi-physique. La dégradation des matériaux est d'ordre mécano-thermique et le shuntage est d'ordre mécano-électrique. Afin de comprendre les phénomènes liés à l'usure, une analyse locale des contacts est menée en prenant en compte le côté multi-physique. Cependant, les contacts sont très confinés et l'expérimentation se révèle être une chose difficile.

La méthode numérique semble alors adéquat pour répondre à la problématique. Celle qui paraît la plus adaptée est la méthode par éléments discrets. Cette méthode permet de modéliser des éléments distincts avec des lois d'interaction appropriées pour piloter le comportement des particules de premiers corps (matériau sain ou endommagé) mais aussi des particules de troisième corps (cohésif ou non). Ce travail est basé sur les modèles existants afin de construire la modélisation. Le but poursuivi est de reconstruire pas-à-pas le circuit tribologique afin d'éclaircir progressivement les problèmes liés à l'usure.

Un modèle mécano-électrique est utilisé afin de modéliser une couche de troisième corps issue des semelles de frein (problématique liée au shuntage). Le cas modèle d'un matériau homogène composé de graphite est d'abord analysé. Puis, c'est le cas d'un troisième corps constitué de graphite et de cuivre, deux matériaux présents dans les semelles frittées. Ces analyses permettent de mettre en avant l'impact de la composition du troisième corps ainsi que des paramètres locaux ( $\mu$ ,  $\gamma$ ) sur les grandeurs globales ( $\bar{\mu}$ ,  $\phi$ ,  $R_{eq}$ ). La bonne faisabilité du shuntage semble due à une compétition entre les paramètres mécaniques et électriques.

Suite à cette analyse, le circuit tribologique est enrichi avec ajout du débit source. Le but étant de modéliser la dégradation du matériau de freinage par l'intermédiaire d'un modèle mécano-thermique. Après avoir modélisé des cas simples, un volume élémentaire issu d'une garniture réelle est numérisé. Globalement, l'endommagement de la garniture est accentué par les contraintes mécaniques subies mais également par les effets cohésifs et thermiques. Localement, les différents constituants en jeu ont un impact différent dans les phénomènes de dégradation. De plus, une analyse de la dégradation par rapport à la proportion d'éléments laisse penser qu'une proportion optimale des divers constituants peut minimiser la dégradation.

Enfin, le circuit tribologique est complété avec le débit d'usure. Afin de réellement analyser l'usure, ce modèle complet est nécessaire. Différents types d'usure (instantanée, évolutive) montre un impact différent sur l'évolution tribologique du contact. Tant au niveau de l'échantillon que des constituants, un équilibre entre débit source et débit d'usure permet à une couche stable de troisième corps de protéger le matériau de freinage. Cependant, le critère d'usure choisi reste simpliste au vu du nombre de paramètres influençant l'usure.

L'un des principaux points soulevés au cours de ces travaux, et qui a été remarqué dans tous les aspects de l'usure, est le phénomène de compétition menant aux comportements recherchés. En effet, une compétition a lieu entre paramètres locaux pour tendre vers certains comportements globaux. Une compétition a également lieu entre grandeurs globales de façon à permettre au système de tendre vers un équilibre. Ces compétitions (locales et globales) sont avant tout des compétitions entre les différentes physiques en jeu afin d'atteindre cet équilibre. Enfin, une compétition globale/locale a également lieu du fait de l'influence de la proportion des constituants sur la compétition entre grandeurs globales.

Certains paramètres se sont révélés avoir une certaine importance dans les phénomènes liés à l'usure (shuntage, dégradation), les paramètres locaux ( $\mu$ ,  $\gamma$ ,  $\beta_\alpha$ ) mais aussi les sollicitations ( $P$ ,  $V$ ). Ces derniers sont liés aux grandeurs globales qui gouvernent ces phénomènes ( $R_{eq}$ ,  $\bar{\mu}$ ,  $\phi$ ,  $\bar{\beta}$ ,  $\omega$ ,  $T$ ). Toutefois, un paramètre semble être à la frontière des différentes physiques rencontrées, il s'agit de la masse volumique locale  $\rho_{3c}$  du troisième corps. Bien que la masse volumique soit trivialement reliée à la mécanique,  $\rho_{3c}$  influence "l'étalement" du troisième corps, celui-ci devenant alors plus ou moins cohésif, ce qui relie  $\rho_{3c}$  à la physico-chimie. De plus, la compaction du troisième corps modifie la capacité de conduction électrique et influence l'augmentation de chaleur au sein du milieu.  $\rho_{3c}$  est également relié à l'échelle global par l'intermédiaire de la masse volumique globale  $\rho$  du troisième corps (quelques essais portant sur la masse volumique sont répertoriés en annexe 1).

Ainsi, de façon à répondre à la problématique avancée dans le premier chapitre (usure moindre, meilleur shuntage), les constituants des matériaux de freinage doivent :

- être en proportion adéquat,
- être analysés plus localement,
- avoir une masse volumique correspondant aux besoins multi-physiques désirés.

De plus, les débits du circuit tribologique doivent être équilibrés. La figure i synthétise ces travaux en réponse à la problématique.

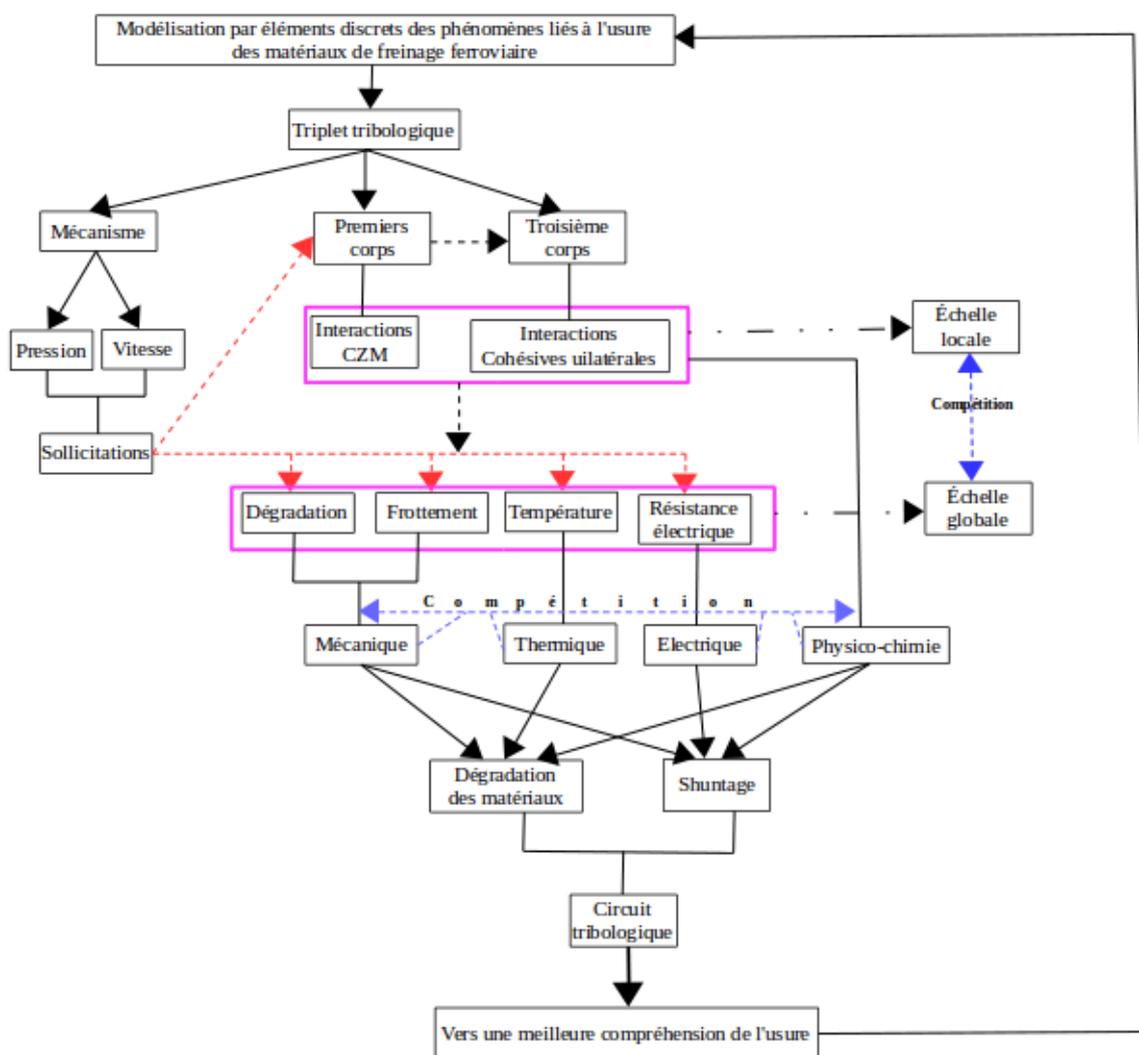


FIGURE i – Synthèse de ces travaux.

La figure i résume ainsi les principales étapes effectuées au cours de ces travaux. Avec une méthode par éléments discrets, il est possible de modéliser le triplet tribologique constitué du mécanisme, des premiers corps et du troisième corps. Le mécanisme est lié à la pression et à la vitesse, toutes deux étant aussi les sollicitations. Les sollicitations agissent sur les premiers corps et créent alors du troisième corps. Au sein des premiers corps, les comportements des particules sont pilotés par une loi CZM et au sein du troisième corps, par une loi unilatérale cohésive. Ces lois d'interaction s'inscrivent à l'échelle locale. De ces lois, des grandeurs telles que dégradation, frottement, température et résistance électrique équivalente peuvent être mesurées à l'échelle globale. A travers ces grandeurs, des comportements multi-physiques (mécanique, thermique, électrique et physico-chimie) sont présents au sein du contact. De plus, des compétitions ont été mis en évidence entre l'échelle locale et l'échelle globale mais aussi entre comportements multi-physiques. Ainsi, il s'avère possible d'analyser les problématiques liés au freinage ferroviaire telles que la dégradation des matériaux mais aussi le shuntage, et ceci, à travers les débits de matière du circuit tribologique. Cette méthode permet de comprendre les mécanismes locaux conduisant à une meilleure compréhension de l'usure. Enfin, la compréhension de ces mécanismes locaux permet de faire évoluer la méthode par éléments discrets afin de se rapprocher, numériquement, des contacts réels.

Cette méthode peut être développée davantage afin de modéliser des comportements plus en adéquation avec la réalité mais également pour concevoir un matériau numérique tribologique (modèle prédictif). Pour cela, les perspectives tenteront d'aller plus loin du fait des nombreux aspects qui restent à explorer.

# Perspectives

Bien que, à travers ce mémoire, certaines questions concernant la problématique soulevée ont été résolues, d'autres points n'ont pu être que partiellement ou pas du tout envisagés, en particulier pour que les comportements modélisés tendent le plus possible vers des comportements réalistes (modèle prédictif). Dans cette dernière partie, les éléments qu'il serait intéressant de soulever pour une poursuite de ce travail sont abordés. Pour être concis, ces objectifs sont séparés en plusieurs parties qu'il est plus utile d'aborder distinctement, bien que des liens existent indéniablement entre elles.

## Comportement mécano-électrique au sein du troisième corps

Lorsque la rhéologie du troisième corps a été analysée, il a été mis en évidence le rôle de la constitution de l'interface dans les phénomènes mécano-électriques s'y déroulant. Cependant, bien que ce modèle donne des tendances proches de la réalité, certains éléments lui font cruellement défaut afin de rendre compte de phénomènes se déroulant au sein d'un milieu réel.

Le premier de ces éléments est l'oxydation [RENO 15]. Pour faire un pas de plus dans la réalité d'un troisième corps issu de la semelle de frein, la prise en compte des phénomènes d'oxydation semble incontournable. En effet, l'oxydation est présente au sein du troisième corps réel et peut modifier les phénomènes s'y déroulant de façon non négligeable. La méthodologie employée pour modéliser ce comportement est explicitée en annexe 2.

Cette incidence de l'oxyde a été illustrée par de premiers résultats (cf. fig. I). Dans ces analyses mécano-électriques non linéaires, la résistance ainsi que le frottement global en comparaison des cas du modèle linéaire ont été représentés. Ces analyses sont effectuées avec une vitesse de 2 m/s, sans frottement local et sans cohésion locale.

Tandis que le frottement évolue de façon similaire dans les deux cas, la résistance ne diminue pas mais semble augmenter légèrement. Ces premières analyses montrent que la résistance évolue différemment en présence d'oxyde. D'autres analyses seront bien sûr

intéressantes à réaliser pour comprendre davantage ces résultats qui ne sont que les premiers d'une nouvelle série d'investigations.

Afin de comprendre le rôle de l'oxydation sur le phénomène de shuntage, des essais similaires à ceux présentés dans le chapitre 3 mais avec oxydation pourraient être menés.

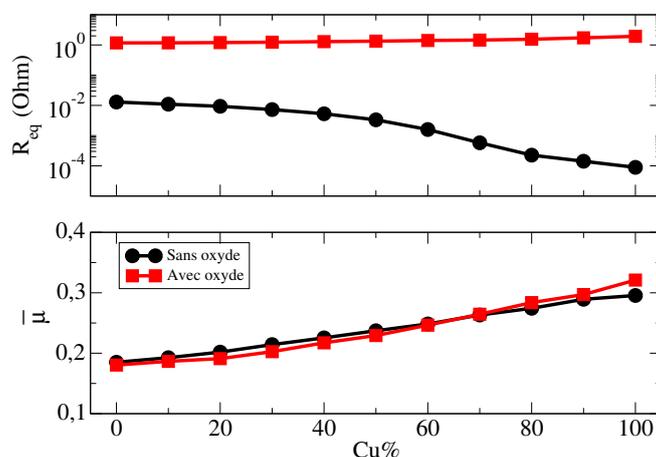


FIGURE I – Comparaison des résultats avec et sans oxyde.

Un autre élément manquant est la modélisation d'un milieu multi-constituants. Un troisième corps réel n'est pas constitué que de deux matériaux. C'est pourquoi, il serait intéressant d'enrichir le modèle pour se rapprocher d'un troisième corps réaliste. Tous les constituants potentiels du troisième corps pourraient être modélisés et pas seulement les constituants des semelles de frein (cf. fig. II). Cela permettrait de comprendre le rôle réel des composants de freinage dans le shuntage par rapport aux autres constituants et surtout de comprendre les influences locales des divers constituants sur les matériaux de freinage.

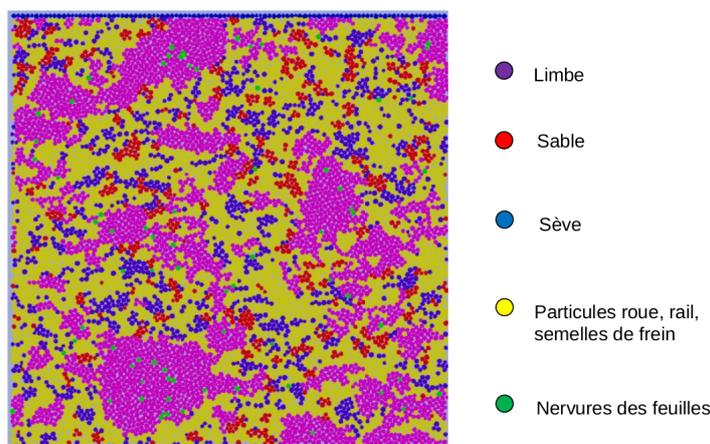


FIGURE II – Représentation numérique d'un troisième corps multi-constituant.

Adjoindre à ce modèle multi-constituant l'oxydation permettrait d'avoir une représentation réaliste de l'interface. La difficulté résiderait alors dans la compréhension des multiples interactions qui complexifierait ces analyses. Cette implication multi-constituant pourrait être liée au débit source externe qui importerait dans le milieu les divers particules provenant de l'extérieur du contact.

## Comportement mécano-thermique de dégradation

Numériquement, d'autres méthodes peuvent être envisagées pour appréhender le comportement des différentes interactions suivant les différents matériaux mais aussi l'importance de l'organisation des constituants dans le matériau de freinage. Pour cela, il est possible d'inter changer les différents constituants pour comprendre davantage l'influence des uns sur les autres (cf. fig. III) mais aussi affiner la discrétisation numérique en diminuant la dimension des différents éléments (pour des dimensions de VE identiques) (cf. fig. IV).

Dans le premier cas, le graphite 2 a été remplacé par le graphite 1, il est également possible de remplacer le graphite 2 par la céramique ou le graphite 2 par la matrice. Ceci peut permettre de vérifier le rôle des interactions suivant la position et la proportion des constituants.

Dans le second cas, le modèle initial à 11 000 particules a été modifié en un système à près de 45 000 particules. Ainsi, la discrétisation est plus fine, les résultats concernant l'endommagement peuvent être plus précis. Cependant, la durée des simulations est alors bien plus longue, ce qui limite la possibilité de simulations pour ce modèle.

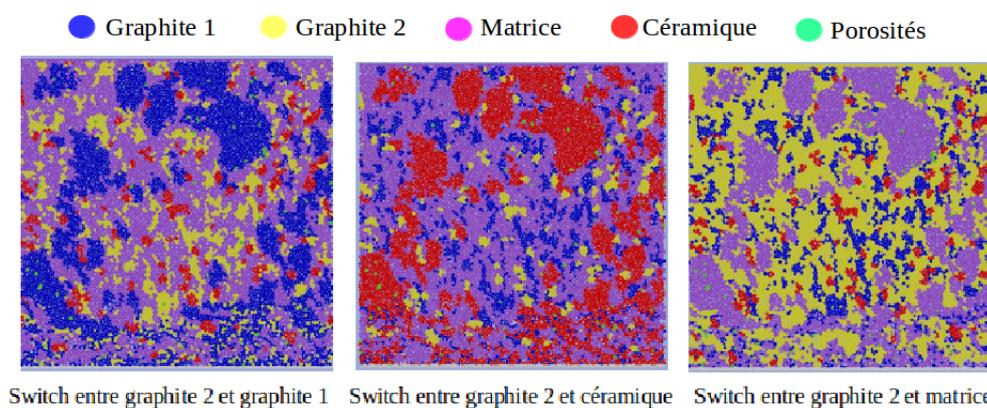


FIGURE III – Switch entre le graphite 2 et (a) le graphite 1, (b) la céramique et (c) la matrice.

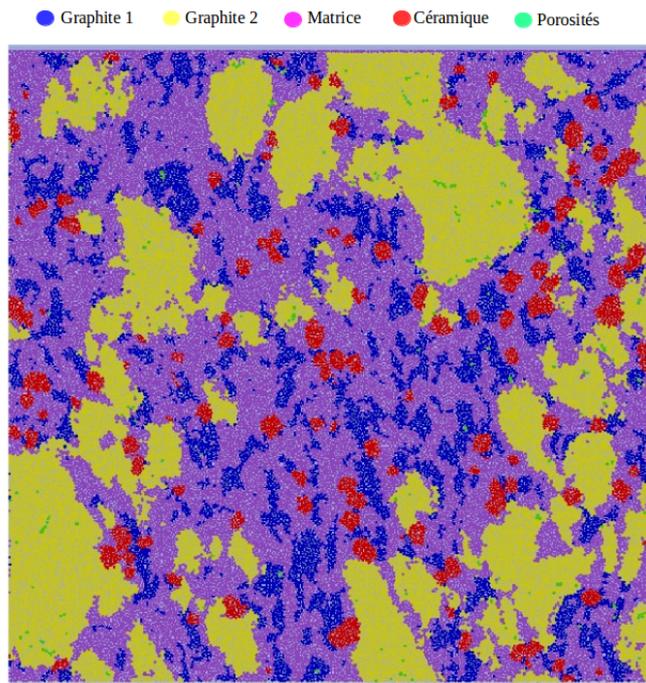


FIGURE IV – Discretisation fine.

Au premier abord, les sollicitations subies par les modèles utilisés semblent être principalement d’ordre mécanique. Cependant, si un thème physique est abordé, les “autres physiques” peuvent également intervenir et avoir une influence sur les interactions [BAKL 13]. Par “autres physiques”, il est entendu électrique (comme analysée dans le chapitre 3), thermique (comme analysée dans les chapitres 4 et 5) ou physico-chimique (comme analysée superficiellement au cours de cette étude à travers le paramètre  $\gamma$ ). D’autres physiques peuvent aussi intervenir, en importance plus ou moins différente et qui n’ont peut-être pas été envisagée : acoustique, chimique, ... . De plus, l’échelle d’analyse se révèle être importante, ces analyses se sont déroulées à l’échelle du premier ou du troisième corps, mais seule une infime partie du matériau est modélisé. Se placer à l’échelle plus générale du matériau pourrait apporter d’autres informations. Et il est vrai que pour comprendre pleinement un problème tribologique, il est souvent nécessaire de se placer à plusieurs échelles différentes [BERT 88].

## Modélisation complète des phénomènes en jeu

La modélisation sera complète lorsque les phénomènes abordés seront tous pris en compte. Ainsi, le modèle devra combiner mécanique, électrique et thermique, celui-ci a déjà été expérimenté par Zeng [ZENG 16(2)]. Il devra prendre en compte tous les flux de matière, de nombreuses conditions devront être vérifiées quant au débit d’usure de façon à se rapprocher au mieux des observations. Ce modèle permettra de tenir compte

de l'action mécanique qui provoque le détachement des particules et de l'action thermique lié à l'aspect mécanique. Il devra prendre également en considération le comportement mécanique et physico-chimique des particules au sein du troisième corps de même que la propagation d'électricité à travers celui-ci et la génération de chaleur qui peut en découler.

Afin de modéliser pleinement la problématique du freinage ferroviaire abordée dans ce mémoire, il semble indispensable de partir d'un modèle 3D de la garniture G36S et de l'utiliser en tant que modèle multi-physique. Pour cela (cf. fig. V), il faut considérer le système mécanique soumis à une pression et à une vitesse dont le premier corps supérieur va se dégrader sur le premier corps inférieur. Dans ce modèle, il faut tenir compte de la chaleur générée à l'intérieur du contact et conduite entre les deux premiers corps. Ceci serait représentatif de l'usure du matériau de freinage. Puis, en parallèle, il faut considérer ce même système mécanique mais au sein duquel se propage de l'électricité (entre les deux premiers corps). Ceci serait alors représentatif du rôle des constituants du matériau de freinage dans le phénomène de shuntage.

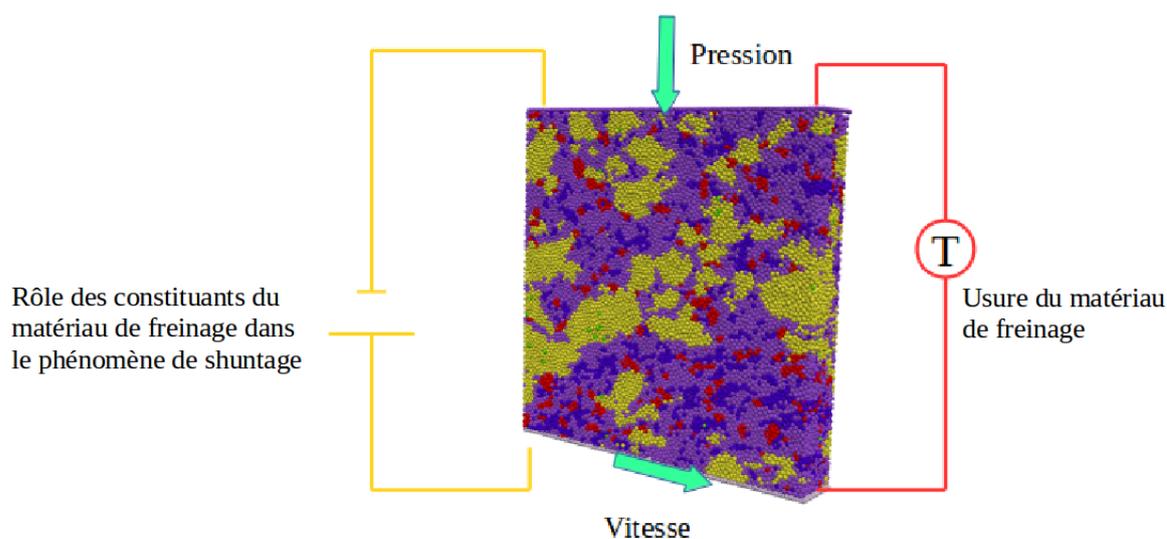


FIGURE V – Modèle complet.

Il serait ainsi intéressant d'utiliser un modèle multi-physique combinant mécanique, électrique et thermique dans un modèle 3D pour représenter en un seul modèle les problématiques ferroviaires analysées et de faire un pas de plus vers l'observation des phénomènes réels. La mise en application d'un modèle 3D est développée en annexe 3. Il n'a pas été possible de produire un nombre pertinent de résultats avec ce modèle du fait du temps de simulation très important ainsi que de limitations liées à la méthode numérique.

## Éléments discrets

La méthode numérique doit encore être développée afin de modéliser ce qui fait défaut ici. Listons ces futurs développements possibles :

- modèle multi-physique : un modèle combinant mécanique, électrique et thermique a été développé par Zeng [ZENG 16(2)], Cependant d'autres développements s'avèrent nécessaires afin de le rendre utilisable pour tout type de cas,
- oxydation : l'oxydation est complexe à modéliser, les essais réalisés ici laisse à penser qu'il est encore nécessaire de développer le modèle électrique non linéaire pour rendre compte plus aisément de ces problèmes,
- modèle 3D : le modèle tri-dimensionnel n'est pas encore totalement opérationnel, certains éléments tels que la dégradation ou les lois d'interaction utilisées en 2D ne sont pas encore implémentées dans le modèle,
- quantification : l'un des manques de la méthode par éléments discrets est la quantification qui permettrait de comparer les résultats numériques et expérimentaux de façon plus fiable,
- lois d'interaction : bien que les lois utilisées soient assez simples tout en se rapprochant des phénomènes réels, elles se devraient d'être plus complexes pour rendre davantage compte des phénomènes réels,
- temps de calcul : le temps de calcul peut vite devenir immense (4 jours pour modéliser 2 ms de freinage); un modèle moins local tel qu'un couplage entre éléments discrets et éléments finis pourrait être envisagé pour des temps de calcul plus raisonnables; toutefois, les modèles numériques visant à comprendre les phénomènes locaux au sein des contacts (comme c'est le cas ici) y perdrait beaucoup en précision.

## Protocoles expérimentaux

Les modèles et résultats présentés au cours de ce mémoire avaient pour vocation de comprendre les phénomènes liés à l'usure. Après l'analyse numérique, des analyses expérimentales pourront venir confirmer les tendances numériques ou soulever de nouvelles interrogations. C'est le cas, notamment, avec le banc d'essais du laboratoire de mécanique de Lille destiné à étudier l'usure de la garniture G36S. Les premiers protocoles expérimentaux ayant été discutés. Une autre façon d'analyser expérimentalement l'usure serait de créer un matériau modèle afin d'établir un glossaire de *bons* matériaux de freinage. Cette idée est explorée en annexe 4. Quelques essais de caractérisations expérimentales (sur la G36S) ont par ailleurs été menés et sont illustrés en annexe 5.

## Avancées tribologiques : SiMj

Au cours de ces travaux, le triplet tribologique introduit par Godet [GODE 84] puis le circuit tribologique mis en avant par Berthier [BERT 88] ont permis d'accentuer la compréhension du contact et des phénomènes s'y déroulant. Cependant, l'association du triplet et du circuit ne suffit pas à expliquer la façon dont les corps en contact supportent les charges et accommodent les mouvements relatifs dans le contact. Pour cela, un nouveau formalisme a été développé par Berthier en 1988 [BERT 89]. Celui-ci permet un couplage entre les sites  $Si^3$  et les modes  $Mj^4$  d'accommodation (cf. fig. VI).

Ce formalisme permet de décomposer le contact en six parties : S0, le mécanisme ; S1 et S5, les premiers corps ; S2 et S4, les peaux des premiers corps (écrans) ; S3, le troisième corps. Quant aux modes d'accommodation, ils sont au nombre de quatre : M1, déformation plastique ; M2, propagation de fissure ; M3, cisaillement ; M4, roulement.

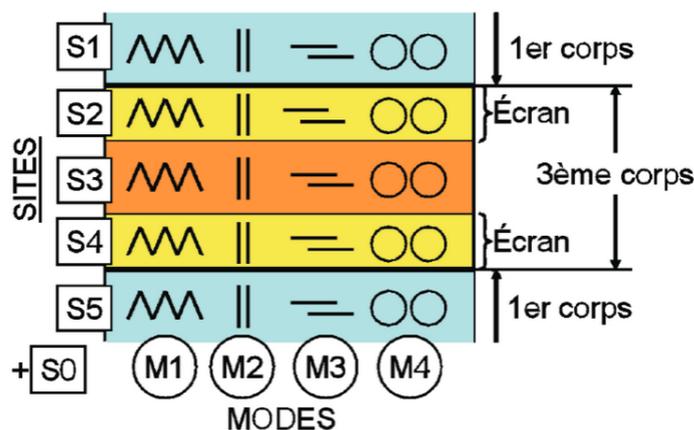


FIGURE VI – Représentation des SiMj.

Ce formalisme n'a pas été abordé au cours de ces travaux de thèse mais nécessite néanmoins de s'y intéresser afin de faire un pas de plus dans la compréhension de ce qui anime les écoulements de matière au sein du circuit tribologique [DENA 14]. Pour cela, les résultats numériques obtenus peuvent être analysés au travers de ce formalisme afin de décrire plus finement les comportements de la matière au sein des contacts.

## Conception d'un matériau numérique tribologique

La conclusion de ce mémoire a permis de synthétiser la méthode à l'origine de la création d'un matériau numérique tribologique (cf. fig. i). Les perspectives ont ensuite

3. Lieu où se produisent les phénomènes.  
4. Type d'accommodation.

amenées à la réflexion quant aux besoins nécessaires à la conception d'un tel matériau. A savoir l'affinement de la discrétisation pour une meilleure représentativité, la modélisation des nombreux comportements multi-physiques dont l'influence de la thermique et la présence d'oxydation au sein du contact mais aussi la représentation 3D qui est nécessaire pour tendre vers une modélisation plus en adéquation avec les comportements se déroulant au sein des contacts physiques (en particulier, prise en compte des débits latéraux).

De ces aspects, les grandeurs globales pourront être mesurées. Mais avant, il est nécessaire de calibrer les paramètres locaux correspondant aux matériaux désirés par les constructeurs de matériaux de freinage ferroviaire. Pour cela, des analyses paramétriques doivent être réalisées pour déterminer au mieux les paramètres locaux permettant d'obtenir un contrôle de l'usure attendu.

Pour contrôler l'usure, il est nécessaire de contrôler les débits de matière, la figure VII présente une hypothèse de ces contrôles. La vitesse de cisaillement engendre un endommagement des liaisons entre particules de premiers corps. Ce dernier est à l'origine de débit source lui-même à l'origine de débit interne. Le débit interne est influencé par les paramètres de frottement local et de cohésion locale et a une action sur le débit source (limitant ce dernier si le débit interne est suffisamment important). Du débit interne peut apparaître un débit d'éjection séparé entre débit de recirculation et débit d'usure, ces deux derniers étant dépendant des critères d'usure. Le débit de recirculation peut modifier le débit interne et le débit d'usure est lié au débit source sous forme de compétition.

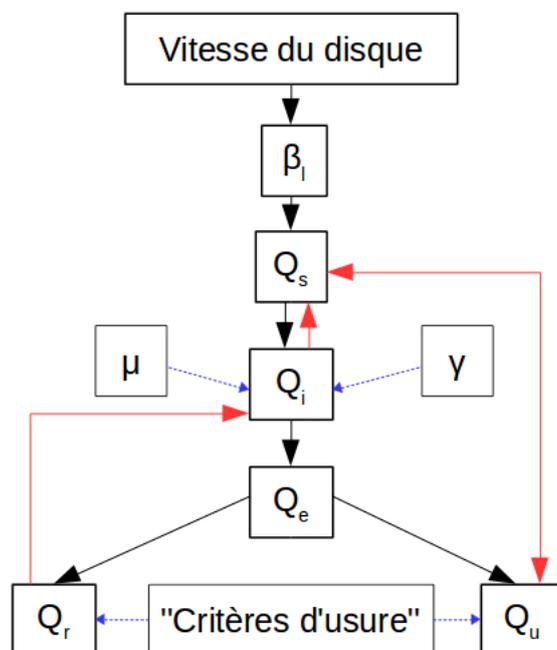


FIGURE VII – Contrôle des débits.

Les lois d'interaction et les critères d'usure devront être enrichies afin de réaliser un contrôle des débits correspondant aux grandeurs globales recherchées par les constructeurs de matériaux de freinage ferroviaire. Lorsque cette étape aura été effectuée alors les matériaux de freinage pourront être conçus physiquement. Le modèle numérique pourra alors devenir un outil de conception de matériau tribologique. Cette idée est poursuivie en annexe 6.

De nouveaux systèmes de freinage verront probablement le jour dans la prochaine décennie mais tant que les problèmes de frottement existeront, l'intérêt porté au freinage et à ses conséquences ne cessera de croître.



# Annexes

*Annexe 1 : Quelques essais numériques sur la masse volumique*

*Annexe 2 : Prise en compte de l'oxydation*

*Annexe 3 : Modélisation 3D*

*Annexe 4 : Matériaux modèles*

*Annexe 5 : Caractérisation de la G36S*

*Annexe 6 : Conception de matériaux tribologiques*



# Annexe 1 : Quelques essais numériques sur la masse volumique

Une analyse de la masse volumique dans le cadre de l'écoulement du troisième corps entre deux parois rigides non déformables a été menée (modèle du chapitre 3).

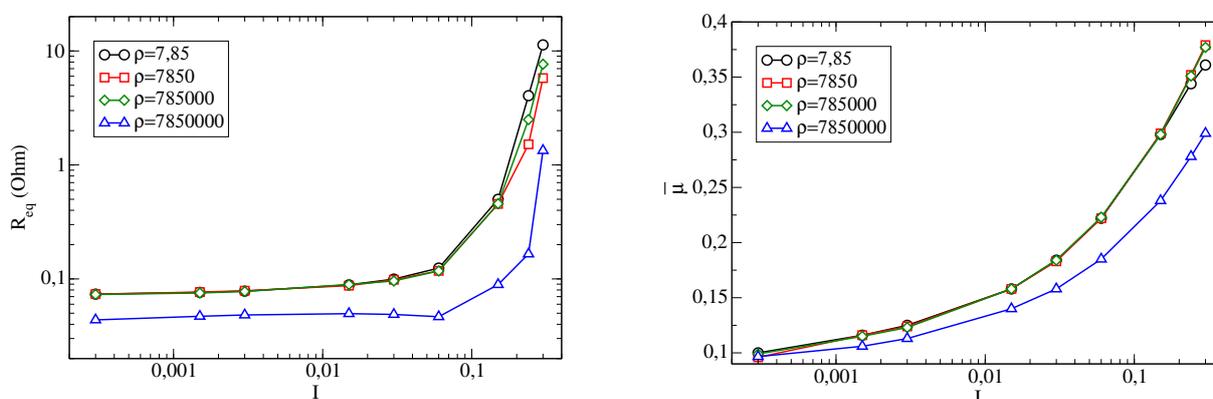


FIGURE A – Évolution de la résistance équivalente et du frottement global en fonction de  $I$  pour différentes valeurs de masses volumiques des parois.

Après avoir modifié les masses volumiques des parois (cf. fig. A), nous observons une saturation au delà d'une certaine masse volumique. En effet, lorsque  $\rho_{parois}$  est augmentée, la résistance ne varie quasiment pas jusqu'à une certaine valeur au delà de laquelle la résistance est moins élevée. En ce qui concerne le frottement global, ce palier est également observé à une différence près. La courbe représentant la plus haute valeur de  $\rho_{parois}$  part du même point que les autres courbes (pour un faible  $I$ ) et s'éloigne à mesure que la dynamique du milieu devient importante.

Rappelons que le nombre inertiel est calculé avec la masse volumique des particules. Nous avons alors transformé ce nombre pour qu'il soit calculé avec la moyenne de la masse volumique des parois et des particules tel que :

$$\rho = \frac{\rho_{parois} + \rho_{particules}}{2} \quad (5.5)$$

De ce fait, nous observons, en figure B, un décalage des courbes vers la droite du graphe, les valeurs de  $I$  étant augmentées, et ceci d'autant plus que  $\rho_{parois}$  est élevée.

Ceci permet de séparer les courbes pour de meilleures observations tout en remarquant toujours davantage le palier.

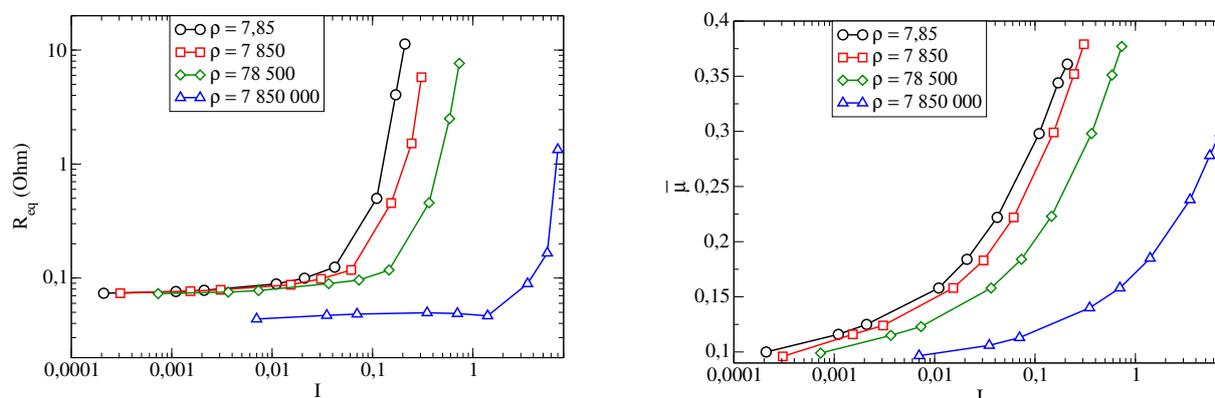


FIGURE B – Évolution de la résistance équivalente et du frottement global en fonction de  $I$  pour différentes valeurs de masses volumiques des parois, la valeur de  $I$  étant calculée avec une valeur moyenne des masses volumiques des parois et des particules.

L'augmentation de la masse volumique des parois serait comparable à l'augmentation de la masse de ces parois et donc à la pression appliquée, ce qui explique que la résistance diminue. Cependant, le palier n'est pas observé lorsque c'est la pression qui est augmentée. Les parois sont de faibles dimensions, le poids de celles-ci est bien inférieure à la force appliquée et c'est au delà d'un poids critique que ne peut supporter la paroi que la différence de pression est vraiment significative.

Lorsque le nombre inertiel est calculé avec cette modification de masse volumique, les grandeurs globales en sont influencées. Ainsi, la masse volumique du troisième corps (ce qui nous fait remonter à la définition même du nombre inertiel) est d'une grande importance sur les phénomènes s'y déroulant.

D'autres essais plus approfondis portant sur la masse volumique devront être menés afin d'appréhender le rôle de ce paramètre dans la vie tribologique des contacts.

# Annexe 2 : Prise en compte de l'oxydation

Au cours de ces travaux, nous avons tenté d'amener et de comprendre l'oxydation dans le modèle numérique. Nous n'avons pu approfondir suffisamment cet aspect pour qu'il soit pertinent de l'aborder dans le corps du manuscrit. Les bases de ces recherches sont posées dans cette annexe.

Afin d'aborder la notion d'oxydation, trois axes sont explicités, la prise en compte au sein du modèle numérique, les conditions numériques d'applications et les limitations rencontrées [RENO 15].

## Prise en compte numérique

L'oxyde est présente au sein du troisième corps. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2, l'électricité se propage à travers les particules de troisième corps dans le cadre d'un modèle linéaire où intensité et tension sont proportionnelles. En présence d'oxyde, le modèle devient non linéaire (cf. fig. C). En plus de la conductance mécanique, une conductance de l'oxyde ( $C_0$ ) est introduite au niveau du contact. La conductance équivalente entre deux particules s'écrit :

$$C_\alpha = (C_i C_j) / (C_i + C_j + ((C_i C_j) / C_m) + ((C_i C_j) / C_0)) \quad (5.6)$$

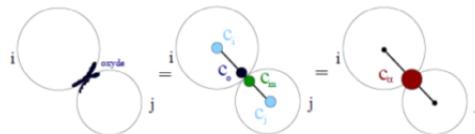


FIGURE C – Interactions non linéaires [RENO 15].

Dans l'équation précédente, si  $C_0 = 0$ , la couche d'oxyde ne conduit pas l'électricité, le contact est alors isolant.

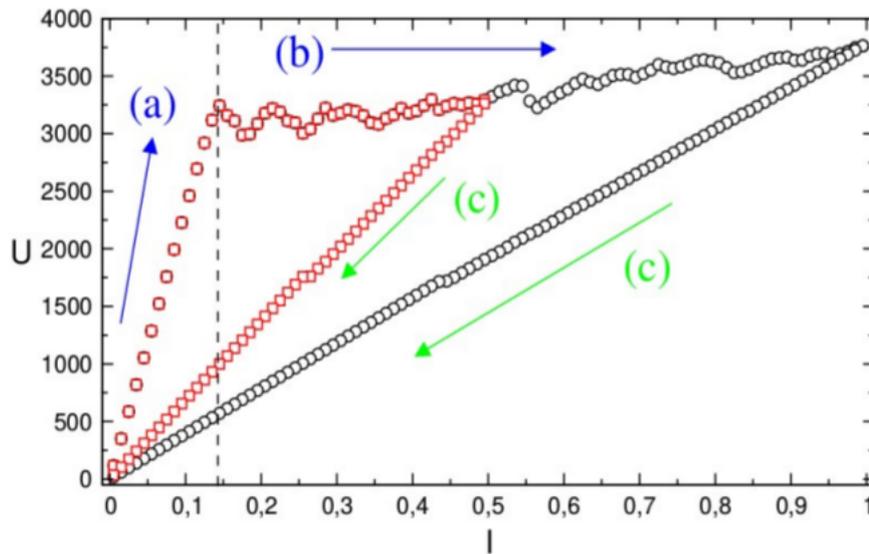


FIGURE D – Caractéristique intensité-tension non linéaire [RENO 15].

La caractéristique intensité tension du modèle non linéaire est représenté en figure D. Dans la partie (a), le comportement est ohmique, à faible courant. A partir d'une intensité critique, la tension de saturation est atteinte (en (b)) et il y a claquage des couches d'oxyde. En re-diminuant alors l'intensité (en (c)), le comportement sera ohmique mais non identique à la caractéristique ohmique de la phase allée. Plus l'intensité sera grande lors de la phase allée, moins la résistance de la phase retour sera grande. Ce comportement est assimilable à l'effet Branly.

En 1888, Branly conduisit une expérience dans laquelle il prit un tube en verre contenant de la limaille métallique. Celle-ci se trouvait être comprimée entre deux plaques conductrices (dont la force de compression était réglable). La mesure de la résistance aux bornes des deux plaques était très élevée (de l'ordre de quelques  $M\Omega$ ). Lors de l'exposition du tube à une onde électromagnétique, la résistance chuta, le dispositif devint conducteur. Lors de la disparition de l'onde électromagnétique, le tube resta dans cet état. Toutefois, un petit choc sur les parois du tube suffirent à le rendre à nouveau isolant retrouvant alors une haute résistance [ELIE 13] [FALC 04] [FALC 05].

De même façon que pour l'effet Branly, nous retrouvons cet état métastable dû à la saturation électromagnétique.

## Conditions numériques

Les hypothèses mises en avant pour l'exactitude du modèle sont les suivantes [RENO 15] :

- Nous considérons que l'oxyde est présente de façon aléatoire dans le troisième corps et qu'elle possède une couche d'épaisseur variable. Physiquement les couches d'oxyde considérées sont de l'ordre du nanomètre voire inférieure. Cette grandeur est largement inférieure au diamètre moyen de nos particules. Nous considérons donc que l'oxyde va intervenir uniquement aux points de contact.
- La couche d'oxyde possède une résistance propre 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  $C_{moy}$  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 :  $C_o = p_o * C_{moy}$ .
- 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 seules les conductances des particules et du contact nous permettent de déterminer la conductance totale locale.
- Les mouvements inter granulaires, même minimes, créent des variations dans les forces de contact, 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, à l'instant  $t$  lors de la résolution du problème électrique, un contact est oxydé (resp. non oxydé), celui-ci 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 alors avec le statut oxydé.

## Difficultés liées à la modélisation

La modélisation d'un système oxydé est plus coûteuse en temps de calcul mais aussi plus délicate à mettre en œuvre car il faut tenir compte des paramètres de glissements mécaniques et électriques (aussi appelés paramètres de claquage mécaniques et électriques) de façon à ce que l'évolution du troisième corps en présence d'oxyde soit correctement représentée.

Lors du claquage électrique, la tension est suffisamment élevée pour qu'une partie de l'oxyde devienne conducteur, cette phase se produit généralement sur les premiers pas de temps de la simulation. Tandis que le claquage mécanique se produit sur le reste de la simulation et sous l'action du cisaillement, le nombre de contacts oxydés diminuent, ce qui rend le troisième corps plus conducteur.

Comme énoncé précédemment, les contacts en début de simulation sont oxydés, la difficulté ici est de calibrer suffisamment bien les paramètres seuils afin que le nombre de contacts ne diminue pas trop vite mais rende compte malgré tout de l'état mécanique et électrique dû à l'oxydation.

# Annexe 3 : Modélisation 3D

Les résultats 2D présentés au cours de ce mémoire donnent de très bonnes corrélations avec les résultats expérimentaux [ZENG 16(2)] [RIVI 15(2)]. Toutefois, un modèle 3D peut être avantageux pour la prise en compte des débits tribologiques latéraux ainsi que le mouvement des éléments de discrétisation dans les trois directions d'espace.

## Modèle homogène

Le modèle constitué d'un matériau homogène (cf. fig. E) est un cas simple ayant déjà été traité dans la littérature [FILL 04]. Des conditions périodiques sont définies suivant  $x$  et suivant  $y$ . Ainsi, lorsque des particules franchissent ces frontières périodiques, elles sont ré-injectées par l'autre extrémité du contact. Ces conditions sont modifiées dans le cas où nous désirons éjecter définitivement certaines particules.

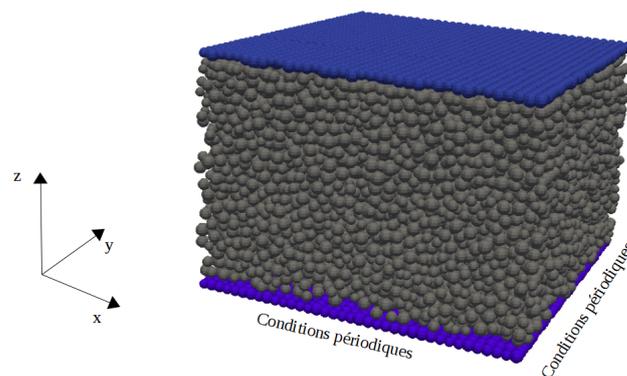


FIGURE E – Modèle 3D homogène.

## Modèle basé sur la garniture G36S

Suite aux analyses des matériaux de freinage issues de la G36S, nous désirons aller plus loin dans le but de modéliser celle-ci en 3D.

Positionner des éléments de la garniture dans un modèle 3D n'est pas aussi aisée que c'est le cas en 2D (cf. chapitre 4). Nous avons alors procédé différemment. Nous avons prélevé 20 VE 2D issus des images tomographiques, ces VE faisant chacun 600 pixels de côtés, soit 2,1 mm (la taille d'un pixel étant 0,0035 mm). Ainsi, de même façon qu'auparavant, nous avons créé 20 VE numériques 2D (cf. fig. F - Étape 1).

Puis, nous avons modifié les fichiers déterminant la géométrie des corps afin que les VE 2D deviennent des VE 3D (cf. fig. F - Étape 2).

Enfin, nous avons placé, dans le fichier de gestion des corps, ces différentes géométries pour obtenir une configuration 3D de la garniture (cf. fig. F - Étape 3).

La garniture numérique ainsi générée est constituée de plus de 130 000 particules. Elle a une longueur de 2,1 mm (suivant  $x$ ), une hauteur de 2,1 mm (suivant  $z$ ) et une épaisseur de 0,3 mm (suivant  $y$ ).

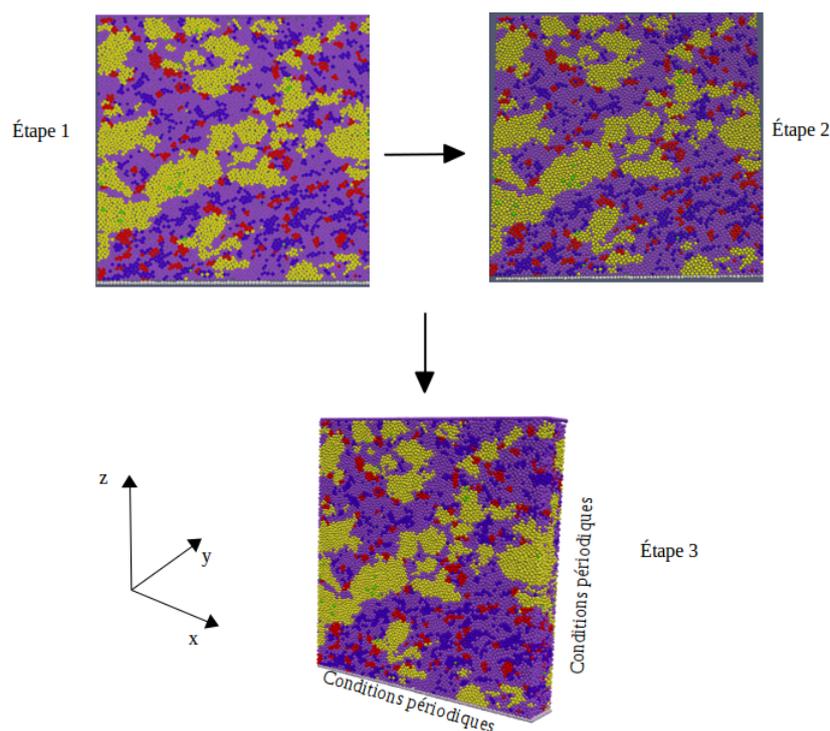


FIGURE F – Modèle 3D d'une garniture de freinage.

Les paramètres limitants concernant cette modélisation 3D sont les temps de calcul exorbitant ainsi que le besoin de développement dont souffre la modélisation 3D dans LMGC90.

## Annexe 4 : Matériaux modèles

Avant de baser les volumes élémentaires sur la garniture G36S, nous avions une première idée ambitieuse. Notre objectif était de concevoir un matériau modèle avec des volumes élémentaires représentatifs (VER) imposés afin de mener une étude sur le circuit tribologique. Pour cela, nous avions pour idée de créer une bibliothèque de VER représentant les différents débits, ce qui aurait permis de comprendre les mécanismes d'endommagement et d'usure (débits source, d'éjection, d'usure, ...).

Pour la conception, nous souhaitions réaliser un matériau modèle par frittage laser à l'aide d'une imprimante 3D ou par frittage classique. Le matériau devant être suffisamment cohésif (peu friable) pour permettre une bonne tenue mécanique mais pas trop pour permettre le détachement de particules lors des frottements. Il aurait été intéressant de réaliser un échantillon avec forte cohésion, un échantillon avec cohésion moyenne et un échantillon avec faible cohésion.

La construction du matériau modèle est illustrée dans le tableau A, nous voulions ainsi concevoir un matériau constitué de petits cubes (ou parallélépipèdes) représentant les volumes élémentaires, eux-même constitués de petites particules. Le but était alors d'analyser la séparation, après frottement, des blocs ou particules suivant les différentes cohésions en jeu.

Ce travail aurait été réparti entre l'expérimentation avec la création de ces matériaux modèles et la mise en application des données expérimentales à un modèle numérique réalisé avec LMG90.

Malheureusement, après avoir contacté les spécialistes s'occupant d'impression 3D, il s'est avéré ne pas être possible de créer ainsi des blocs accolés avec cette technologie. En effet, l'impression 3D a pour but de créer un matériau couche par couche et permet l'introduction de la porosité dans le matériau ainsi créé, cependant, il n'est pas possible de créer des VER comme souhaité ci dessus. Le matériau modèle ne pouvait être constitué de plusieurs matériaux, le bac de poudre initial, avant étalement et opération de frittage ne pouvant être constitué que d'un seul type de poudre (calibration de l'imprimante). De plus, le frittage ne pourrait être effectué successivement sur deux blocs de matériaux pour les accoler entre eux (de par l'orientation du laser principalement).

Nous avons alors eu l'idée de nous diriger vers le frittage classique mais il ne peut pas, de même que le frittage par imprimante 3D, permettre de créer des "blocs" contenant plusieurs matériaux. Le problème majeur est de trouver un moyen de "coller" les blocs ensemble après opération de frittage ce qui aurait pris un temps considérable.

Malgré ces difficultés, il serait vraiment intéressant, lors de futurs travaux, de parvenir à concevoir ce type de matériaux modèles dans le but d'établir un catalogue de *bons* matériaux de freinage suivant les conditions locales. Ce qui sera conjointement lié à une analyse numérique comme celle que nous avons effectuée au cours de ces travaux de thèse. Le tableau A illustre les idées d'analyses évoquées.

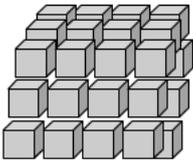
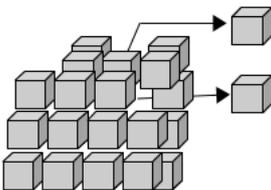
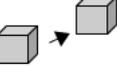
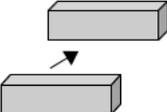
	Matériau modèle	Blocs cubiques constituant le matériau modèle	Blocs parallélépipédiques constituant le matériau modèle	Particules constituant les blocs
Avant frottements				
Après frottements				
Dimensions (mm)	80 * 60 * 10	Environ 5 * 5 * 5	Environ 5 * 4 * 3	Ø 0.03 à 0.07
Paramètres de liaison	Cohésion $\gamma$ dans la garniture (fonction de $\gamma_1$ (cubes), $\gamma_2$ (parallélépipèdes) et $\gamma_3$ (particules))	Cohésion $\gamma_1$ entre cubes ( $\gamma_{1a}$ , $\gamma_{1b}$ , $\gamma_{1c}$ , ...)	Cohésion $\gamma_2$ entre parallélépipèdes ( $\gamma_{2a}$ , $\gamma_{2b}$ , $\gamma_{2c}$ , ...)	Cohésion $\gamma_3$ entre particules ( $\gamma_{3a}$ , $\gamma_{3b}$ , $\gamma_{3c}$ , ...)

Tableau A – Matériaux modèles.

# Annexe 5 : Caractérisation de la G36S

Le matériau de freinage qui sert de base au modèle numérique est une garniture monobloc destiné au freinage des TGV (G36S). Dans cette annexe, nous allons décrire succinctement son procédé de fabrication ainsi que quelques étapes de caractérisation que nous avons effectué avant de l'implémenter dans le modèle numérique.

## Fabrication

Lors de la fabrication de ce type de matériaux frittés, il y a d'abord une phase où les poudres sont mélangées, à hauteur de 70 % de matrice métallique, 20 % de graphite et 10 % de céramique (en masse). Puis, elles sont compressées avec une force de  $2 \text{ à } 7 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ . Après une phase de mise en forme, elles sont passées dans un four haute pression pour la phase de frittage, la température peut s'élever à  $1\ 100 \text{ °C}$  pendant 8h. Enfin, il y a une phase de finition pour atteindre les matériaux commercialisables. Les différentes étapes sont illustrées en figure G.

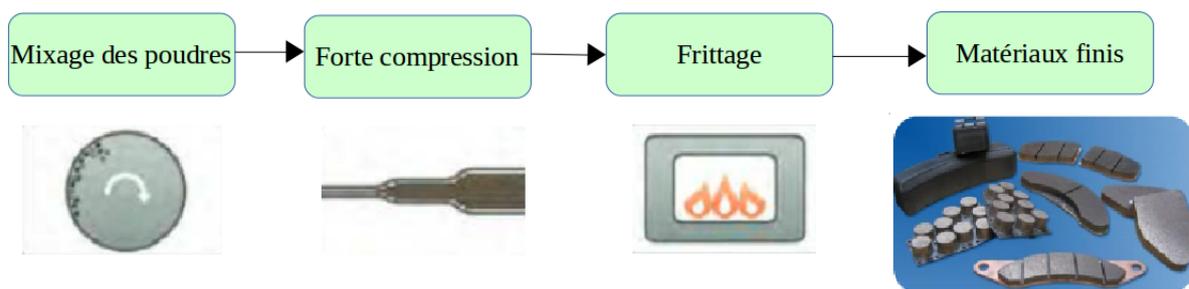


FIGURE G – Fabrication des matériaux de freinage frittés [ENCY 17].

## LIBS

Nous avons été amené à effectuer une caractérisation de la garniture par une méthode de spectroscopie sur plasma induit par laser ou “laser induced breakdown spectroscopy” (LIBS) afin de mener une analyse de la composition chimique de l'échantillon [ENCY 17].

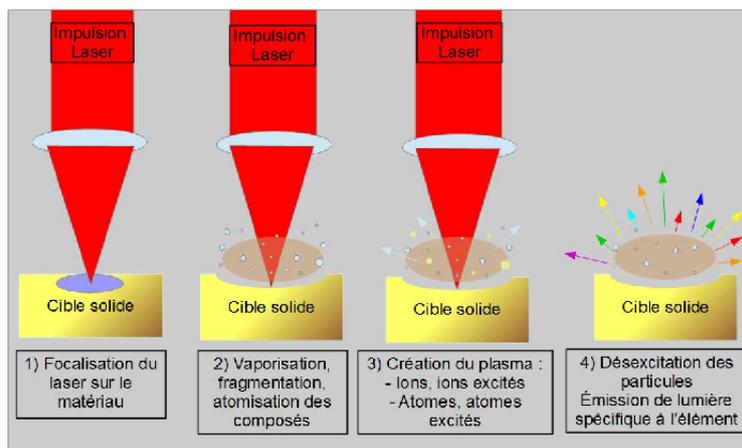


FIGURE H – Principe du LIBS [ENCY 17].

Le principe du LIBS est illustré en figure H, un faisceau laser est focalisé sur une zone précise du matériau, des atomes sont éjectés de la zone d'impact, c'est en réalité un plasma, crée suite à la puissance du laser, qui est éjecté, celui-ci est composé d'atomes et d'ions, excités ou non. La désexcitation des particules éjectées provoquent une émission de lumière spécifique à chaque élément éjecté.

La figure I illustre les résultats des deux essais menés avec le LIBS, on retrouve les principaux éléments présents dans la garniture. Seuls les graphites ne sont pas mis en évidence car le carbone fait partie des pollutions du milieu ambiant.

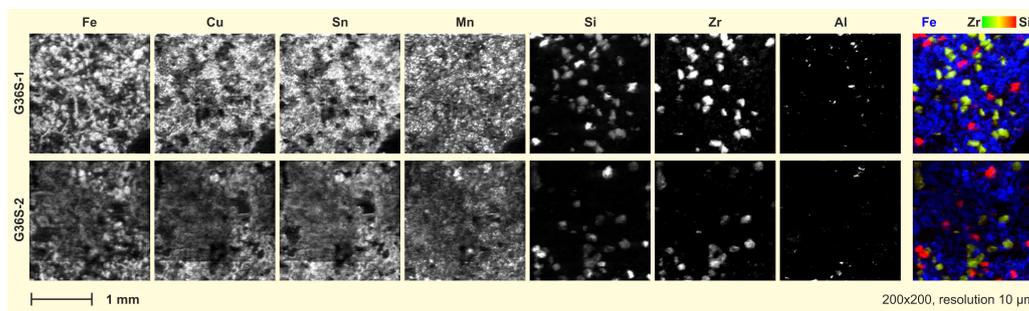


FIGURE I – Résultats issus du LIBS.

# Annexe 6 : Conception de matériaux tribologiques

Dans la problématique liée à l'usure des matériaux de freinage ferroviaire, le modèle discret peut permettre de découpler les différents paramètres locaux, et d'évaluer l'impact de ces paramètres, à travers les débits (critères d'usure), sur les grandeurs globales. Le modèle numérique en 3D avec les comportements multi-physiques souhaités permet d'analyser cet impact d'un point de vue plus réaliste. Si cet impact, sur les grandeurs globales, est représentatif des besoins attendus par les constructeurs, ces matériaux pourraient alors être conçus physiquement (cf. fig. J).

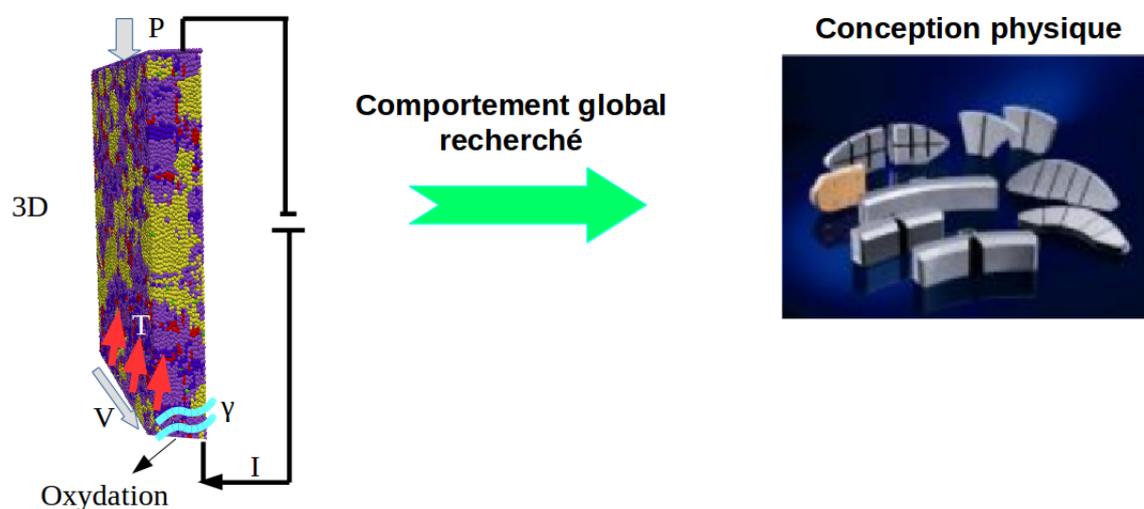


FIGURE J – Du modèle discret à la conception physique.

Cette modélisation, pouvant alors devenir prédictive, peut permettre de réaliser un catalogue de “bons” matériaux de freinage (constitution et paramètres d'entrée du modèle (paramètres locaux et critères d'usure)).

Au delà de la problématique ferroviaire qui est au cœur de ces travaux de thèse, ce type de méthode numérique peut être applicable à tous types de problèmes tribologiques en contact sec.

Un exemple d'application est donnée dans la suite et pour un tout autre domaine scientifique : la biologie. L'application présentée concerne, plus particulièrement, la découpe de tissus. Cette découpe peut être effectuée à l'aide d'un microtome (cf. fig. K), cet instrument est équipé d'une lame permettant de procéder à une découpe des tissus avant une analyse en laboratoire.



FIGURE K – Microtome. [ENCY 17]

Les biologistes désirent alors analyser la déformation de la matière suite à la découpe mais souhaitent également connaître la composition de la partie découpée. D'un point de vue tribologique, ils souhaitent analyser le troisième corps présent en surface de la lame. Afin d'être plus précis, la figure L illustre la découpe des tissus avec la lame.

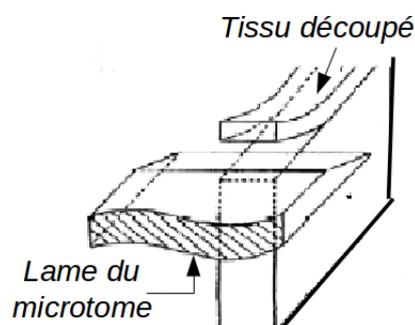


FIGURE L – Schéma de la découpe de tissu avec la lame d'un microtome.

Un modèle par éléments discrets peut être réalisé pour répondre à cette problématique (cf. fig. M). La lame est modélisée par une paroi rigide (sur laquelle est appliquée une vitesse). Les tissus, de part et d'autre de la lame, sont modélisés par des premiers corps dégradables (soumis à des lois CZM). La vitesse de la lame engendre une dégradation des premiers corps créant ainsi du troisième corps. Ce troisième corps peut alors être analysé, en termes de composition et de déformation des fragments pour répondre à la problématique des biologistes.

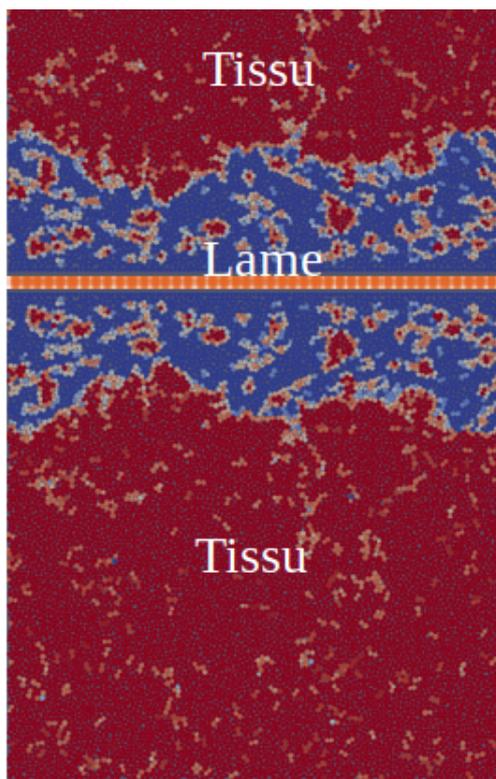


FIGURE M – Modélisation de la découpe par microtome.

Et bien d'autres problématiques pouvant se rapporter à la tribologie pourraient être analysées avec ce type de modèle par éléments discrets. Cela fait du modèle établi au cours de ces travaux de thèse un modèle général pour les problématiques tribologiques en contact sec.



# Bibliographie

- [ANDR 12] D. André, I. Iordanoff, J.-L. Charles, J. Néauport  
Discrete element method to simulate continuous material by using the cohesive beam model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 213 - 216, p. 113, 2012.
- [ARCH 53] J. F. Archard  
Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics* 24, p. 981, 1953.
- [ARNA 17] P. Arnaud  
Simulation par éléments finis de la compétition usure/fissure en fretting avec prise en compte du 3ème corps. *JIFT*, 2017.
- [BAGN 10] M. Bagnéris, F. Dubois  
Contributions of python to LMGC90 platform. *EuroScipy*, 2010.
- [BAKL 13] M. Baklouti  
Analyse tribologique du rôle de constituants dans les performances de matériaux composites organiques pour les garnitures de frein. *Thèse*, laboratoire de mécanique de Lille, université de Lille, 2013.
- [BELA 09] R. Belakdhar  
Étude des mécanismes de fretting dans les contacts électriques bas-niveau étamés. *thèse*, 2009.
- [BERT 88] Y. Berthier  
Mécanismes et tribologie. *Thèse*, 1988.
- [BERT 89] Y. Berthier, M. Godet, M. Brendle  
Velocity Accommodation in Friction. *Tribology Transactions* 32, p. 490, 1989.
- [BERT 04] Y. Berthier, S. Descartes  
The role and effects of the third body in the wheel-rail interaction. *Wear* 258, p. 1081, 2004.
- [BOWD 86] F. P. Bowden, D. Tabor  
The Friction and Lubrication of Solids. 2nd edn. *Oxford University Press*, Clarendon Press, 1986.
- [BRUN 07] F. Brunel  
Étude thermomécanique du couple roue-semelle ferroviaire sous sollicitations de freinage. *Thèse*, laboratoire de mécanique de Lille, université de Lille, 2007.

- [BUCC 09] G. Bucca, A. Collina  
A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system. *Wear* 266(1–2), p. 46, 2009.
- [BULT 06] A.-L. Bulthe  
Caractérisation expérimentale du contact frottant disque garniture sous sollicitations sévères de freinage : Prise en compte des interactions tribologie, thermique et physico-chimie *Thèse*, laboratoire de mécanique de Lille, université de Lille, 2006.
- [CAO 11] H.-P. CAO  
Modélisation par éléments discrets rigides et/ou déformables des milieux granulaires et des troisièmes corps solides. *Thèse*, laboratoire de mécanique, des contacts et des structures, université de Lyon, 2011.
- [CART 01] M. Cartier, P. Kapsa  
Usure des contacts mécaniques – Problématique et définitions. *Techniques de l'ingénieur*, 2001.
- [CHAM 14] M. Champagne, M. Renouf, Y. Berthier  
Modeling wear for heterogeneous bi-phasic materials using discrete elements approach. *Journal of tribology* 136, 2014.
- [CHAP 07] P. Chapas  
Traction ferroviaire – Équipements d'exploitation et de sécurité. *Technique de l'ingénieur*, 2007.
- [CHAP 18] E. Chapeuil, M. Renouf, C. Zeng, Y. Berthier  
Influence of Copper/Graphite Properties on the Tribological and Electrical Behavior of Copper-Graphite Third Body Layer. *Lubricants* 6(110), 2018.
- [CLEO 10] L.-M. Cleon, F. Poisson  
Acoustique des transports ferroviaires. *Techniques de l'ingénieur*, 2010.
- [COPI 00] R. Copin  
Étude du comportement tribologique de couples de matériaux industriels sur tribomètre reproduisant les conditions de freinage ferroviaire. *Thèse*, laboratoire de mécanique de Lille, université de Lille, 2000.
- [CREY 06] M. Creyssels  
Quelques propriétés du transport électrique dans les milieux granulaires. *Thèse*, école normale supérieure de Lyon, 2006.
- [CUND 92] P. A. Cundall, R. D. Hart  
Numerical modelling of discontinua. *Engineering computations* 9(2), p. 101, 1992.
- [DACR 05] F. Da Cruz, S. Emam, M. Prochnow, J. N. Roux, F. Chevoir  
Rheophysics of dense granular materials : discrete simulation of plane shear flows. *Phys Rev E* 72, 021309, 2005.

- [DECI 15] Faiveley transport  
www.decibell-Faiveley.eu. Consulté en 2015.
- [DEMA 06] P. Demanche  
SNCF. *improving the knowledge of electrical wheel-rail contact*, uic, 2006.
- [DENA 14] J. Denape  
Third body concept and wear particle behavior in dry friction sliding conditions. *Tribological aspects in modern aircraft industry. Trans Tech Publications*, p. 425, 2014.
- [DESC 05] S. Descartes, C. Desrayaud, E. Niccolini, Y. Berthier  
Presence and role of the third body in a wheel-rail contact, *Wear 258*, p. 1081, 2005.
- [DESC 08] S. Descartes, C. Desrayaud, Y. Berthier  
Expérimental identification and characterisation of the effects of contaminants in the wheel-rail contact. *proc. IMechE 222 Part F, Rail and rapid transit*, 2008.
- [DESC 08(2)] S. Descartes, M. Renouf, N. Fillot, B. Gautier, A. Descamps, Y. Berthier, P. Demanche  
A new mechanical/electrical approach to the wheel-rail contact. *Wear 265*, p. 1408, 2008.
- [DESC 15] Deschamps-web  
www.Deschamps-web.com. Consulté en 2015.
- [DUBO 08] F. Dubois, M. Renouf, M. Jean  
Extensions d'une méthode par éléments discrets pour la modélisation de milieux divisés complexes. *8 e colloque national en calcul des structures*, 2008.
- [DUBO 11] F. Dubois, M. Jean  
LMGC90. *10e Colloque National en Calcul des Structures*, 2011.
- [ELIE 13] F. Elie  
L'effet Branly électrocinétique des milieux granulaires, <http://fred.elie.free.fr>, 2013.
- [ENCY 17] Wikipédia  
www.wikipédia.fr. Consulté entre 2015 et 2018.
- [EPSF 12] EPSF  
Aptitude au shuntage des matériels roulants et des semelles, 2012.
- [FALC 04] E. Falcon, B. Castaing  
Electrical conductivity in granular media and Branly's coherer : A simple experiment. *American journal of physics 73*, P. 302, 2004.
- [FALC 05] E. Falcon, B. Castaing  
L'effet Branly continu. *Bulletin de la société française de physique 148*, p. 9, 2005.

- [FILL 04] N. Fillot  
Étude mécanique de l'usure - modélisation par éléments discrets des débits de troisième corps solide. *Thèse*, laboratoire de mécanique, des contacts et des structures, université de Lyon, 2004.
- [FR3 02] FRANCE 3  
C'est pas sorcier. *Emission TV*, 2002.
- [FORT 08] A. Fortain  
Caractérisation des particules en gares souterraines. *Thèse*, laboratoire d'étude des phénomènes de transfert et de l'instantanéité : Agro-industrie et Bâtiment, université de la Rochelle, 2008.
- [FREN 86] J. Frêne  
La tribologie de l'antiquité à nos jours. *Bulletin de l'union des physiciens* 689, 1986.
- [GODE 84] M. Godet  
The third-body approach : a mechanical view of wear. *Wear* 136, p. 437, 1984.
- [GODE 90] M. Godet  
Third bodies in tribology. *Wear* 136, p. 29, 1990.
- [GREE 86] J. A. Greenwood  
Constriction resistance and the real area of contact. *British Journal of Applied Physics* 17, p. 1621, 1986.
- [HADD 14] H. Haddad, M. Guessasma, J. Fortin  
Heat transfer by conduction using dem-fem coupling method. *Computational Materials Science* 81, p. 339, 2014.
- [HAHN 11] M. Hahn, M. Schwarz, B.-H. Kröplin, T. Wallmersperger  
Discrete element method for the thermal field : Proof of concept and determination of the material parameters. *Computational Materials Science* 50(10), p. 2771, 2011.
- [HENT 16] N. Hentati  
Matériaux composites a matrice organique pour garnitures de frein : analyse des liens entre le procédé d'élaboration, la microstructure, les propriétés et le comportement tribologique : analyse des liens entre le procédé d'élaboration, la microstructure, les propriétés et le comportement tribologique. *Thèse*, laboratoire de mécanique de Lille, université de Lille, 2016.
- [HERT 82] Hertz H. R. Uber die Berührung fester elastischer Körper. *J. reine und angewandte Mathematik*, vol. 92, 1882, p. 156 - 171.
- [HERT 95] H. Hertz  
Ueber die beruehrung elastischer koerper (on contact between elastic bodies). *Gesammelte Werke (Collected Works)* 1, 1895.

- [HOLM 81] R. Holm  
Electrical contact. *Springer*, 1981.
- [HU 08] Z. L. HU, G.-Y. DING, Z.-H. CHEN, J.-T. XIA  
Wear property of high-resistivity carbon brushes made with and without mos2 in variable humidity. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China* 18 p. 340, 2008.
- [INRE 06] INRETS, SNCF, LaMCoS  
Projet SNCF – Shuntage dans le contact roue-rail. *Bibliographie interne*, 2006.
- [JEAN 99] M. Jean  
The non-smooth contact dynamic method. *Comp Methods Appl Mech Engng* 177, p. 235, 1999.
- [JIAN 05] M.-J. Jiang, H.-S. Yu, D. Harris  
A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance. *Computers and Geotechnics* 32(5), p. 340, 2005.
- [KOVA 96] J. Kováčik, J. Bielek  
Electrical conductivity of Cu/graphite composite material as a function of structural characteristics. *Scripta Materialia* 35, p. 151, 1996.
- [KOVA 08] J. Kováčik, S. Emmer, J. Bielek, L. Keleši  
Effect of composition on friction coefficient of Cu-graphite composites. *Wear* 265, p. 417, 2008.
- [LEWI 04] R. Lewis, U. Olofsson  
Mapping rail wear regimes and transitions. *Wear* 257, p. 721, 2004.
- [LIM 87] S. C. Lim, M. F. Ashby  
Wear-mechanism maps. *Acta metal* 35(1), p. 1, 1987.
- [LINC 05] V. Linck  
Modélisation numérique temporelle d'un contact frottant. *Thèse*, laboratoire de mécanique, des contacts et des structures, université de Lyon, 2005.
- [LOYE 12] A. Loyer  
Étude numérique et expérimentale du crissement des systèmes de freinage ferroviaires. *Thèse*, laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes, école centrale de Lyon, 2012.
- [MAJC 03] D. Majcherczak  
Etude thermique d'un contact glissant : Approche numérique et expérimentale -Application au freinage. *Thèse*, laboratoire de mécanique de Lille, université de Lille, 2003.
- [MORE 88] 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*, p. 1, 1988.

- [NATI 18] 3DNatives  
https://www.3dnatives.com/technologies-3d/, consulté en Septembre 2018.
- [OBSE 15] Observatoire Régional des Transports et de la Logistique de Lorraine  
Émissions atmosphériques des transports en Lorraine, 2015.
- [OSTE 10] W. Osterle, C. Prietzel, Kloß, A. I. Dmitriev  
On the role of copper in brake friction materials. *Tribol. Inter.* 43, p. 2317, 2010.
- [OZDE 10] I. Özdemir, W. A. M. Brekelmans, M. G. D. Geers  
A thermo-mechanical cohesive zone model. *Comput. Mech.* 46, p. 735, 2010.
- [PERA 05] F. Perales  
Fissuration des matériaux à gradient de propriétés. Application au Zircaloy hydruré. *Thèse*, université Montpellier 2, 2005.
- [PERA 08] F. Perales, S. Bourgeois, A. Chrysochoos, Y. Monerie  
Two field multibody method for periodic homogenization in fracture mechanics of nonlinear heterogeneous materials. *Engineering Fracture Mechanics* 75(11), p. 3378, 2008.
- [POUL 04] O. Pouliquen  
Écoulements granulaires secs. *HDR*, 2004.
- [RABI 53] E. Rabinowicz  
The Nature of the Static and Kinetic Coefficients of Friction. *Journal of Applied Physics* 22, 1373 (2004) ;
- [RAIL 15] Rail21  
Florent.Brisou.pagesperso-orange.fr, 2015.
- [RAOU 99] M. Raous, L. Cangémi, M. Cocu  
A consistent model coupling adhesion, friction, and unilateral contact. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 177(3-4), p. 383, 1999.
- [RENO 04] M. Renouf, P. Alart  
Conjugate gradient type algorithms for frictional multicontact problems : applications to granular materials. *Comp. Methods Appl. Mech. Engng.* 194, p. 2019, 2004.
- [RENO 04(2)] M. Renouf  
Optimisation numérique et calcul parallèle pour l'étude des milieux divisés bi- et tridimensionnels. *Thèse*, 2004.
- [RENO 06] M. Renouf, A. Saulot, Y. Berthier  
Third-body flow during wheel-rail interaction. *3ème European Conference on Computational Mechanics*, 2006.
- [RENO 08] M. Renouf, N. Fillot  
Coupling electrical and mechanical effect in discrete element simulation. *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 74, p. 238, 2008.

- [RENO 10] M. Renouf  
Simulations numériques en tribologie-Contact sec et lubrification solide. *Techniques de l'ingénieur*, 2010.
- [RENO 11] M. Renouf, H. P. Cao, V. H. Nhu  
Multiphysical modeling of third body rheology. *Tribol. Inter.* 44, p. 417, 2011.
- [RENO 11(2)] M. Renouf, F. Massi, N. Fillot, A. Saulot  
Numerical tribology of a dry contact. *Tribology International* 44, p. 834, 2011.
- [RENO 15] M. Renouf  
Troisième corps solide. *HDR*, 2015.
- [RIVI 15] J. Riviere, M. Renouf, Y. Berthier  
Thermo-mechanical investigations of a tribological interface. *Tribol. lett.* 58(3), p. 48, 2015.
- [RIVI 15(2)] J. Rivière  
Réponses thermo-mécaniques des interfaces tribologiques - cas du freinage aéronautique. *Thèse*, laboratoire de mécanique, des contact et des structures, université de Lyon, 2015.
- [RFF 11] RFF  
Prévention des risques de déshuntage, Rôle des entreprises ferroviaires. *Commission "Shuntage"*, 2011.
- [RODL 12] J. Rodler, B. Hagenah, R. Lassy  
Dust in railway tunnels : causes, risks and counter-measures. *Tunnel et espace souterrain* 231, 2012.
- [ROGN 06] P. G. Rognon, J.- N. Roux &  
Rheophysics of cohesive granular materials. *Europhysics letter* 74, p. 644, 2006.
- [SERR 14] I. Serrano  
Champs 3D de distribution des phases dans les matériaux modèles. *CoMatCo, document interne*, 2014.
- [SNCB 15] SNCB transport  
Freinage des trains – Principes de base. *Centre de formation*, 2015.
- [SU 15] L. Su, F. Gao, X. Han, R. Fu, E. Zhang  
Tribological behavior of copper-graphite powder third body on copper-based friction materials. *Tribol. lett.* 60(2), p. 1, 2015.
- [SU 15(2)] L. Su, F. Gao, X. Han, J. Chen  
Effect of copper powder third body on tribological property of copper-based friction materials. *Tribol. Inter.* 90, p. 420, 2015.
- [SU 17] L. Su, F. Gao, H. Tao, X. Han, R. Fu  
Influence of third body evolution on tribological property of copper-matrix friction material by surface treatment. *AIP Conf Proc* 1839(1), p. 020001, 2017.

- [TANG 08] Y. Tang, H. Liu, H. Zhao, L. Liu, Y. Wu  
Friction and wear properties of copper matrix composites reinforced with short carbon fibers. *Materials and design* 29, p. 257, 2008.
- [TEKA 11] A. Tekaya, R. Bouzedar, V. Bourny, J. Fortain, K. Bourbatashe  
Transport électrique dans les milieux granulaires : Effet d'une force de compression statique, 20ème congrès français de mécanique, 2011.
- [TING 89] J. M. Ting, B. T. Corkum, C. R. Kauffman, C. Greco  
Discrete numerical model for soil mechanics. *Journal of Geotechnical Engineering* 115(3), p. 379, 1989.
- [TUDO 03] A. Tudor, C. Radulescu, I. Petre  
Thermal effect of the brake shoes – Friction on the wheel-rail contact. *Tribology in industry* 25, 2003.
- [UIC 11] UIC  
La Deutsche Bahn fait passer les trains silencieux à l'étape supérieure. *Communiqué de presse*, 2011.
- [VARG 01] W.-L. Vargas, J. J. McCarthy  
Heat conduction in granular materials. *AIChE Journal* 47(5), p. 1052, 2001,
- [WICK 09] P. Wicker  
Influence des garnitures de frein sur les sollicitations thermiques des disques TGV et conséquences sur les risques de fissuration. *Thèse*, 2009.
- [ZENG 16] C. Zeng, M. Renouf, Y. Berthier, R. Hamdi  
Numerical investigation on the electrical transmission ability of a shearing powder layer. *Granular Matter* 16(2), p. 1, 2016.
- [ZENG 16(2)] C. Zeng  
Modélisation multi-physique du comportement tribologique du contact balai-collecteur - cas des démarreurs stop-start. *Thèse*, laboratoire de mécanique et de gestion des contacts, université Montpellier 2, 2016.
- [ZHAO 01] H. Zhao, G. C. Barber, J. Liu  
Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current. *Wear* 249, p. 409, 2001.





# Abréviations

<b>CDV</b>	<b>C</b> ircuit <b>D</b> e <b>V</b> oie
<b>CZM</b>	<b>C</b> ohesive <b>Z</b> one <b>M</b> odel
<b>DEM</b>	<b>D</b> iscrete <b>E</b> lement <b>M</b> ethod
<b>LIBS</b>	<b>L</b> aser <b>I</b> nduced <b>B</b> reakdown <b>S</b> pectroscopy
<b>LMGC90</b>	<b>L</b> ogiciel de <b>M</b> écanique et de <b>G</b> estion des <b>C</b> ontacts écrit en fortran <b>90</b>
<b>MEB</b>	<b>N</b> on <b>M</b> icroscope <b>E</b> lectronique à <b>B</b> alayage
<b>NLGS</b>	<b>N</b> on <b>L</b> inear algorithm of <b>G</b> auss <b>S</b> eidel
<b>NSCD</b>	<b>N</b> on <b>S</b> mooth <b>C</b> ontact <b>D</b> ynamics
<b>SNCF</b>	<b>S</b> ociété <b>N</b> ational des <b>C</b> hemins de <b>F</b> er
<b>TGV</b>	<b>T</b> rain <b>G</b> rande <b>V</b> itesse
<b>VE</b>	<b>V</b> olume <b>E</b> lémentaire
<b>VER</b>	<b>V</b> olume <b>E</b> lémentaire <b>R</b> éprésentatif



# Liste des symboles

## Paramètres matériaux

$E^*$	Module d'Young équivalent des matériaux en contact	Pa
$E_{eff}$	Module d'Young effectif	Pa
$C_n$	Rigidité normale	Pa
$C_t$	Rigidité tangentielle	Pa
$\rho$	Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
$Y$	Limite d'élasticité du matériau	Pa
$m$	Masse des éléments	kg
$D$	Dureté du matériau le plus mou	
$K_U$	Coefficient d'usure dépendant des corps en contact	
$\nu$	Coefficient de Poisson	

## Paramètres géométrique

$a$	Rayon de l'aire de contact	m
$a_p$	Rayon de l'aire de contact pour une déformation plastique	m
$r$	Rayon des éléments	m
$R^*$	Rayon de courbure équivalent des sphères en contact	m
$d$	Diamètre des éléments	m
$L$	Longueur de la zone d'application de la force	m
$H$	Hauteur maximale de l'échantillon	m
$h_{3C}$	Hauteur de 3e corps cisailé	m
$e$	Épaisseur de la couche d'oxyde	m
$V_p$	Volume des pores	m <sup>3</sup>
$V_t$	Volume total de l'échantillon	m <sup>3</sup>

$s$	Section de la zone de constriction	$m^2$
$S^*$	Surface équivalente	$m^2$
$i, j$	Numéros de particules	

### Mécanique

$P$	Pression globale	Pa
$V$	Vitesse de cisaillement	m/s
$V_0$	Vitesse initiale	m/s
$F_n$	Force normale	N
$F_t$	Force tangentielle	N
$F$	Charge appliquée	N
$d_g$	Distance de glissement	m
$I$	Nombre inertiel	
$\mu$	Coefficient de frottement local	
$\bar{\mu}$	Coefficient de frottement global moyen	
$\phi$	Porosité	
$b$	Paramètre de viscosité	

### NSCD

$\dot{\mathbf{q}}$	Vitesse globale	m/s
$\mathbf{v}$	Vitesse locale des éléments	m/s
$\mathbf{R}$	Force globale	N
$\mathbf{r}$	Force locale aux contacts	N
$\mathbb{H}$	Opérateur de passage	

### Interactions

$g$	Gap (distance) entre deux éléments	m
$g_{el}$	Gap (distance) maximal d'élasticité entre deux éléments	m
$\beta_\alpha$	Paramètre d'endommagement locale d'interaction	
$\beta_i$	Endommagement moyen des interactions pour une particule $i$	
$\bar{\beta}$	Endommagement moyen de l'échantillon à l'échelle globale	
$\omega$	Dégradation moyenne	

$\alpha$	Numéro de contact
$Z$	Nombre moyen de voisins
$n^0$	Nombre d'interactions dans l'échantillon numérique
$n_i^0$	Nombre de contact initial impliquant la particule $i$

**Tribologie**

$Q_s^i$	Débit source interne
$Q_s^e$	Débit source externe
$Q_i$	Débit interne
$Q_r$	Débit de recirculation
$Q_e$	Débit d'éjection
$Q_u$	Débit d'usure

**Numérique**

$D_a$	Distance d'alerte	m
$dt$	Pas de temps	s
$t$	Temps	s

**Thermique**

$\lambda$	Conductivité thermique	W/m K
$c$	Capacité thermique massique	J/kg K
$T_{max}$	Température maximale dans tout l'échantillon	K
$T_{inf} - T_{sup}$	Différence de température entre les parois supérieures et inférieures	K
$K^c$	Conductance thermique équivalente	m <sup>2</sup> /s
$Q_{gen}$	Flux de génération	W
$Q_{cond}$	Flux de conduction	W
$Q_{conv}$	Flux de convection	W
$Q_{rad}$	Flux de radiation	W

**Electrique**

$\sigma$	Conductivité électrique	S/m
$C$	Conductance électrique	S/m
$\rho_e$	Résistivité électrique	$\Omega$

$R_c$	Résistance électrique de contact (ou de constriction)	$\Omega$
$R_{eq}$	Résistance électrique équivalente	$\Omega$
$I$	Intensité électrique	A
$U$	Tension électrique	V
$E_{pot}$	Potentiel électrique	V
$\mathbb{C}$	Matrice de conductance locale	

**Physico-chimie**

$\gamma$	Cohésion locale	N
$d_w$	Distance de cohésion	m
$E_{coh}$	Énergie cohésive	J
$E_{coh}^*$	Énergie cohésive corrigée	J
$f_n^{coh}$	Force cohésive normale	N
$f_t^{coh}$	Force cohésive tangentielle	N
$\eta$	Indice de cohésion	

# Liste des figures

1.1	Premier système de freinage [RAIL 15]. . . . .	9
1.2	Principe du freinage Westinghouse [ENCY 17]. . . . .	10
1.3	Freins à semelles [ENCY 17]. . . . .	10
1.4	Système de frein à disques (a) et garnitures de freinage (b) [RAIL 15]. . . . .	12
1.5	Schéma du système disque-garniture [DESC 15]. . . . .	12
1.6	Schéma du système roue-semelle [DESC 15]. . . . .	13
1.7	Garniture de freinage (a) neuve (b) usée [COPI 00]. . . . .	14
1.8	Fonctionnement des circuits de voies [CHAP 07]. . . . .	15
1.9	Modèle d'Archard (sur ce schéma, seul le matériau du haut est susceptible de se dégrader) [ARCH 53]. . . . .	18
1.10	Taux d'usure VS glissement [LEWI 04]. . . . .	19
1.11	Carte des coefficients d'usure [LEWI 04]. . . . .	19
1.12	Triplet tribologique [GODE 84]. . . . .	20
1.13	Circuit tribologique [BERT 88]. . . . .	21
1.14	Circuit tribologique entre roue, rail et semelles. . . . .	22
1.15	Évolution du frottement suivant la proportion de graphite d'après Su & al. [SU 15(2)]. . . . .	23
1.16	Thermogrammes, à l'instant de température maximale, pour quatre types de garnitures, durant un freinage d'arrêt de 300 à 0 km/h, d'après Wickers [WICK 09]. . . . .	24
1.17	Épaisseur du troisième corps présent en surface des rails pour (a) une tension résiduelle faible et (b) une tension résiduelle forte en surface de ceux-ci d'après Descartes & al. [DESC 08(2)]. . . . .	24
1.18	Contact confiné entre roue et rail [ENCY 17]. . . . .	25
1.19	Exemple de modélisation par DEM. . . . .	26
1.20	Évolution de la résistance électrique en fonction de la force appliquée d'après Renouf & al. [RENO 08]. . . . .	26
1.21	Représentation numérique de la propagation d'électricité entre roue et rail d'après Descartes & al. [DESC 08(2)]. . . . .	26
1.22	Représentation (a) de la variable d'endommagement $\beta_i$ et (b) de la température d'après Rivière [RIVI 15]. . . . .	27
2.1	Algorithme général d'une approche par DEM. . . . .	31

2.2	Forme de la loi CZM type RCC [PERA 08]. . . . .	32
2.3	Forme de la loi unilatérale cohésive (loi WET). . . . .	34
2.4	Transferts thermiques. . . . .	35
2.5	Réseau de contacts [RENO 08]. . . . .	37
2.6	Pavage de Voronoi. . . . .	39
3.1	Écoulement du troisième corps dans le concept de circuit tribologique. . . . .	44
3.2	Représentation d'un échantillon (cas homogène). . . . .	44
3.3	Illustration de trois régimes d'écoulement suivant la valeur du nombre inertiel et l'évolution du réseau de contact dans ces trois régimes d'après Rognon et al. [ROGN 06] (les traits représentent les forces normales entre particules). . . . .	47
3.4	Évolution du frottement global en fonction de $I$ pour différents niveaux de cohésion et pour des vitesses allant de 0,01 à 10 m/s. . . . .	48
3.5	Évolution de la porosité en fonction de $I$ pour différents niveaux de cohésion et pour des vitesses allant de 0,01 à 10 m/s. . . . .	49
3.6	Visualisation du potentiel électrique pour quatre configurations différentes : $I$ égal à 0,0002 ((a), (c)) et 0,102 ((b), (d)) et $\eta$ égal à 0,001 ((a), (b)) et 5 ((c), (d)). . . . .	50
3.7	Évolution de la résistance équivalente en fonction de $I$ pour différents niveaux de cohésion et pour des vitesses allant de 0,01 à 10 m/s. . . . .	50
3.8	Évolution du frottement global en fonction de : (a) l'énergie de cohésion $\gamma d_w$ et de (b) $\gamma \sqrt{d_w}$ pour différentes distances cohésives et pour un nombre $I$ de 0,03. . . . .	52
3.9	Représentation numérique par DEM d'une mixture cuivre/graphite (50% Cu, 50% Gr). . . . .	53
3.10	Évolution du frottement global pour différents frottements Cu/Gr (0 ; 0,05 et 0,15) et pour (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s. . . . .	54
3.11	Évolution du coefficient de frottement pour une mixture composé principalement de cuivre et de graphite d'après Su & al. [SU 15]. . . . .	54
3.12	Évolution de la porosité pour différents frottements Cu/Gr (0 ; 0,05 et 0,15) et pour (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s. . . . .	55
3.13	Évolution de la résistance électrique globale pour différents frottements Cu/Gr (0 ; 0,5 et 0,15) et pour (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s. . . . .	55
3.14	Évolution du frottement global pour différentes cohésions Cu/Gr (1, 10 et 50 N) et pour (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s. . . . .	56
3.15	Évolution de la porosité pour différentes valeurs de cohésions Cu/Gr (1, 10 et 50 N) et pour (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s. . . . .	57
3.16	Évolution de la résistance électrique globale pour différentes cohésions Cu/Gr (1, 10 et 50 N) et pour (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s. . . . .	57

3.17	Évolution du frottement global pour différents frottements Cu/Gr (0, 0,05 et 0,15) et pour (a) $\gamma_{Cu/Gr} = 0$ N, (b) $\gamma_{Cu/Gr} = 1$ N, (c) $\gamma_{Cu/Gr} = 10$ N. . .	59
3.18	Évolution de la porosité pour différents frottements Cu/Gr (0, 0,05 et 0,15) et pour (a) $\gamma_{Cu/Gr} = 0$ N, (b) $\gamma_{Cu/Gr} = 1$ N, (c) $\gamma_{Cu/Gr} = 10$ N. . . . .	59
3.19	Évolution de la résistance électrique globale pour différents frottements Cu/Gr (0, 0,05 et 0,15) et pour (a) $\gamma_{Cu/Gr} = 0$ N, (b) $\gamma_{Cu/Gr} = 1$ N, (c) $\gamma_{Cu/Gr} = 10$ N. . . . .	60
3.20	Visualisation des états finaux obtenus avec des échantillons composés de 50% de cuivre (en gris) et 50% de graphite (en noir) pour différentes vitesse de cisaillement : (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s. . . . .	60
3.21	Comparaison entre état initial et final du profil de densité de cuivre dans l'épaisseur de l'échantillon (normalisé par le diamètre moyen) pour différentes vitesses de cisaillement : (a) 0,2 m/s, (b) 2 m/s et (c) 20 m/s. . . . .	61
3.22	Évolution du frottement global pour résultats numériques et expérimentaux.	62
3.23	Conditions favorables au shuntage. . . . .	64
4.1	Débits de matière représentés au cours de ce chapitre. . . . .	67
4.2	Du volume réel au volume numérique. . . . .	68
4.3	Échantillons numériques (a) homogène, (b) bi-constituants, (c) G36S. . . .	69
4.4	Endommagement du VE pour différentes pressions et différentes vitesses : les particules de troisième corps sont représentées par la couleur bleu ( $\beta_i = 0$ ). . . . .	71
4.5	Évolution de l'endommagement du VE pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses. . . . .	72
4.6	Évolution de hauteur de troisième corps pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses. . . . .	72
4.7	Évolution du frottement global pour différentes pressions (a) et pour différentes vitesses (b). . . . .	73
4.8	Température au sein du VE. . . . .	74
4.9	Évolution temporelle des températures maximales au sein de l'échantillon pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses. . . . .	74
4.10	Évolution des écarts de température entre les parois supérieure et inférieure du VE pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses. . . . .	75
4.11	Évolution du maximum de température au sein du troisième corps suivant l'épaisseur de celui-ci pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses. . . . .	75
4.12	Évolution (a) de l'endommagement de l'échantillon et (b) de la hauteur de troisième corps pour différentes cohésions, pour une pression de 11,9 MPa et une vitesse de 20 m/s. . . . .	76
4.13	Effet de la cohésion sur la dégradation du matériau. . . . .	76
4.14	Évolution (a) du frottement global moyen et (b) de la dégradation globale (en fin de simulation) en fonction de la cohésion pour une pression de 11,9 MPa et une vitesse de 20 m/s. . . . .	77

4.15	Évolution (a) de la température maximale et (b) de la différence de température entre les parois, pour une pression de 11,9 MPa et une vitesse de 20 m/s. . . . .	77
4.16	Échantillon numérique dans le cas de (a) 20% de matrice, (b) 40% de matrice, (c) 60% de matrice et (d) 80 % de matrice. . . . .	78
4.17	Évolution du frottement global moyen suivant la proportion de matrice (Ma). . . . .	79
4.18	Évolution du maximum de température (en fin de simulation) suivant la proportion de matrice. . . . .	80
4.19	Niveaux de dégradation pour différentes proportion de matrice à $t = 0,5$ ms (en fin de simulation). . . . .	80
4.20	Carte de densité des niveaux de dégradation en fonction du temps et de la proportion de matrice. . . . .	81
4.21	Évolution de l'endommagement pour différentes proportion de matrice (Ma) et différentes rigidités Gr/Ma. . . . .	82
4.22	Niveaux de dégradation pour différentes proportions de matrice à $t = 0,5$ ms et pour différentes valeurs de rigidité Gr/Ma. . . . .	83
4.23	Évolution de l'endommagement pour différentes proportion de matrice (Ma) et différentes énergies de décohésion Gr/Ma. . . . .	84
4.24	Niveaux de dégradation pour différentes proportions de matrice à $t = 0,5$ ms et pour différentes valeurs d'énergie de cohésion Gr/Ma. . . . .	84
4.25	Évolution de l'endommagement pour différentes proportion de matrice (Ma) et différents facteurs de cohésion $\eta_{Gr/Ma}$ . . . . .	85
4.26	Niveaux de dégradation pour différentes proportions de matrice à $t = 0,5$ ms et pour différentes valeurs de cohésion locale de troisième corps Gr/Ma. . . . .	85
4.27	Illustration de la garniture G36S. . . . .	87
4.28	Méthode de tomographie X : Prélèvement - Analyse par tranche - Reconstruction du volume [SERR 14]. . . . .	88
4.29	(a) Exemple d'une coupe transverse (par rapport à la charge $\sigma$ ), (b) Exemple d'une coupe réalisée en parallèle à la charge de compression $\sigma$ [SERR 14]. . . . .	88
4.30	Segmentation (a) transverse à la charge appliquée, (b) parallèle à la charge appliquée [SERR 14]. . . . .	90
4.31	Illustration numérique des VE. . . . .	92
4.32	Proportion de chaque constituant dans les différents VE. . . . .	92
4.33	Nombre de particules de troisième corps pour chacun des constituants et pour les trois VE. . . . .	93
4.34	Évolution du frottement global pour les trois VE. . . . .	93
4.35	Évolution de la dégradation pour les trois VE (a) pour différentes pressions et (b) pour différentes vitesses. . . . .	94
4.36	Représentation de l'endommagement suivant les sollicitations. . . . .	95
4.37	Évolution de la dégradation du matériau suivant (a) la pression et (b) la vitesse. . . . .	95

4.38	Évolution du frottement global suivant (a) la pression et (b) la vitesse. . .	96
4.39	Évolution de la vitesse moyenne au sein du troisième corps suivant (a) la pression et (b) la vitesse. . . . .	96
4.40	Évolution de la température au sein de l'échantillon pour différentes solli- citations. . . . .	97
4.41	Évolution de la température maximale au sein de l'échantillon pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses. . . . .	97
4.42	Évolution de la différence de température entre les parois inférieure et supérieure pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses. . . . .	98
4.43	Comparaison entre l'endommagement et l'évolution thermique pour $P =$ $11,9$ MPa et $V = 25$ m/s. . . . .	98
4.44	Évolution de la température maximale en fonction de l'endommagement pour (a) différentes pressions et (b) différentes vitesses. . . . .	99
4.45	Dégradation des constituants - Pour une vitesse de 25 m/s et des pressions de (a) 0,24 MPa, (b) 2,38 MPa, (c) 7,14 MPa et (d) 11,9 MPa. . . . .	99
4.46	Dégradation des constituants - Pour une pression de 11,9 MPa et des vi- tesses de (a) 5 m/s, (b) 10 m/s, (c) 15 m/s et (d) 20 m/s. . . . .	100
4.47	Représentation (a) de l'état initial de la garniture et de son état final dans le cas (b) d'une pression appliquée de 2,38 MPa et (c) d'une pression appliquée de 11,9 MPa. . . . .	101
4.48	Liens entre endommagement et matériaux pour $P = 11,9$ MPa et $V = 25$ m/s. . . . .	102
4.49	Répartition du nombre de fragments pour chaque constituants, en fin de simulation, et suivant (a) pression et (b) vitesse. . . . .	103
4.50	Répartition des fragments sous forme d'agglomérats ou de particules isolées (pulvérulentes) pour (a) $P = 0,24$ MPa, (b) $P = 2,38$ MPa, (c) $P = 7,14$ MPa et (d) $P = 11,9$ MPa. . . . .	104
4.51	Répartition des fragments sous formes d'agglomérats ou de particules isolées (pulvérulentes) pour (a) $V = 5$ m/s, (b) $V = 10$ m/s, (c) $V = 15$ m/s et (d) $V = 20$ m/s). . . . .	105
4.52	Synthèse sur la dégradation des matériaux de freinage. . . . .	106
4.53	Représentation des débits de matière pour $P = 11,9$ MPa et $V = 25$ m/s. .	107
5.1	Modèle numérique avec conditions périodiques. . . . .	110
5.2	Conditions d'usure appliquées au modèle discret. . . . .	111
5.3	Circuit tribologique complet. . . . .	112
5.4	Représentation des $\beta_i$ pour les différentes phases de simulation : (a) cas sans usure, (b) usure instantanée, (c) usure évolutive. . . . .	113
5.5	Reconstruction du circuit tribologique pour une pression de 11,9 MPa et une vitesse de 25 m/s dans les cas (a) sans usure, (b) usure instantanée, (c) usure évolutive limitée et (d) usure évolutive continue. . . . .	114

5.6	Évolution temporelle dans le cas de l'usure instantanée (a) du débit source, (b) du débit d'usure, (c) du débit interne et (d) de la dégradation globale.	116
5.7	Représentation numérique de l'endommagement du matériau pour diverses sollicitations - usure instantanée.	117
5.8	Évolution temporelle dans le cas de l'usure évolutive (a) du débit source, (b) du débit d'usure, (c) du débit interne et (d) de la dégradation globale.	117
5.9	Dégradation de la garniture (a) et frottement global (b) pour différentes usures.	119
5.10	Température maximale pour différents types d'usure.	120
5.11	Évolution de la température maximale suivant la dégradation pour (a) l'usure instantanée et (b) l'usure évolutive.	120
5.12	Évolution du matériau à 1 ms (avant usure).	121
5.13	Évolution du matériau à 1 ms (usure instantanée).	122
5.14	Évolution du matériau à 1,5 ms (usure instantanée).	123
5.15	Évolution du matériau à 2 ms (usure instantanée).	123
5.16	Évolution de la dégradation suivant les constituants dans le cas de l'usure instantanée.	124
5.17	Évolution de la température suivant les constituants dans le cas de l'usure instantanée.	124
5.18	Proportion des constituants au sein troisième corps dans le cas de l'usure instantanée.	124
5.19	Proportion de particules pulvérulentes au sein du troisième corps dans le cas de l'usure instantanée.	124
5.20	Évolution du matériau à 1,5 ms (usure évolutive).	125
5.21	Évolution du matériau à 2 ms (usure évolutive).	126
5.22	Évolution de la dégradation suivant les constituants dans le cas de l'usure évolutive.	126
5.23	Évolution de la température suivant les constituants dans le cas de l'usure évolutive.	126
5.24	Proportion des constituants au sein troisième corps dans le cas de l'usure évolutive.	127
5.25	Proportion de particules pulvérulentes au sein du troisième corps dans le cas de l'usure évolutive.	127
5.26	Scénario de la vie du contact représenté au cours de ce chapitre.	127
i	Synthèse de ces travaux.	133
I	Comparaison des résultats avec et sans oxyde.	136
II	Représentation numérique d'un troisième corps multi-constituant.	136
III	Switch entre le graphite 2 et (a) le graphite 1, (b) la céramique et (c) la matrice.	137
IV	Discrétisation fine.	138

---

V	Modèle complet. . . . .	139
VI	Représentation des SiMj. . . . .	141
VII	Contrôle des débits. . . . .	142
A	Évolution de la résistance équivalente et du frottement global en fonction de $I$ pour différentes valeurs de masses volumiques des parois. . . . .	147
B	Évolution de la résistance équivalente et du frottement global en fonction de $I$ pour différentes valeurs de masses volumiques des parois, la valeur de $I$ étant calculée avec une valeur moyenne des masses volumiques des parois et des particules. . . . .	148
C	Interactions non linéaires [RENO 15]. . . . .	149
D	Caractéristique intensité-tension non linéaire [RENO 15]. . . . .	150
E	Modèle 3D homogène. . . . .	153
F	Modèle 3D d'une garniture de freinage. . . . .	154
G	Fabrication des matériaux de freinage frittés [ENCY 17]. . . . .	157
H	Principe du LIBS [ENCY 17]. . . . .	158
I	Résultats issus du LIBS. . . . .	158
J	Du modèle discret à la conception physique. . . . .	159
K	Microtome. [ENCY 17] . . . . .	160
L	Schéma de la découpe de tissu avec la lame d'un microtome. . . . .	160
M	Modélisation de la découpe par microtome. . . . .	161



# Liste des tableaux

3.1	Caractéristiques de simulation . . . . .	45
3.2	Paramètres de frottement local . . . . .	53
3.3	Paramètres de cohésion locale . . . . .	56
3.4	Paramètres locaux . . . . .	58
4.1	Paramètres de la loi CZM pour les échantillons homogènes. . . . .	70
4.2	Paramètres de la loi CZM pour les échantillons bi-phasiques. . . . .	79
4.3	Composition de la garniture G36S . . . . .	87
4.4	Paramètres mécano-thermiques associés aux particules numériques . . . . .	91
4.5	Paramètres locaux liés à la loi CZM . . . . .	91
5.1	Proportion du troisième corps avant activation de l'usure et après ré-activation du débit source . . . . .	118
A	Matériaux modèles. . . . .	156



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : Chapeuil	DATE de SOUTENANCE : 17/12/2018
Prénoms : Eric Jean-Pierre	
TITRE : Matériaux numériques tribologiques pour un système de freinage ferroviaire	
NATURE : Doctorat	Numéro d'ordre : 2018LYSEI112
Ecole doctorale : Mécanique - Énergétique - Génie Civil - Acoustique (MEGA)	
Spécialité : Mécanique	
RESUME :	
<p>L'augmentation de la vitesse ferroviaire impose l'amélioration des performances de freinage liés aux matériaux de friction utilisés dans les freins à disques et à semelles. Cependant, l'usure reste un point limitant en terme de performance mais aussi de sécurité. Elle a pour conséquence de détériorer les matériaux (aspects mécano-thermiques) mais aussi de contaminer le contact entre roue et rail par des particules de semelles de frein pouvant isoler électriquement celui-ci (aspects mécano-électriques). Le procédé permettant de localiser les trains, ayant pour principe la conduction électrique entre roue et rail, est alors compromis.</p> <p>Ces problématiques sont gouvernées par les différents contacts (roue/rail, roue/semelle, ...) qui s'inscrivent dans le concept de triplet tribologique. Un triplet est composé des corps en contact (premiers corps), de l'interface (troisième corps) et du mécanisme qui les maintient en contact. Afin de comprendre les phénomènes se produisant au sein des contacts, une analyse multi-physique locale et un découplage des paramètres (mécaniques, thermiques, électriques) s'avèrent nécessaires. Toutefois, cela est difficile à établir expérimentalement, une modélisation numérique par éléments discrets est alors pertinente pour palier à ces besoins.</p> <p>L'écoulement dynamique d'un troisième corps constitué de particules de freinage et la dégradation d'un matériau de freinage réel (suite à des méthodes d'imageries) sont modélisés. Les résultats obtenus ont permis d'appréhender les compétitions existant entre paramètres physiques d'une part (mécanique, électrique, thermique) et paramètres d'échelles d'autre part (local, global). Ces compétitions tendent à minimiser la résistance électrique lorsque les constituants sont en proportion adéquat (meilleure conduction électrique entre roue et rail) mais aussi à équilibrer les débits du circuit tribologique, ce qui conduit à protéger les matériaux (usure contrôlée). En outre, les analyses numériques ont permis de mettre en évidence de nouveaux paramètres liés à "l'étalement" du troisième corps et d'appréhender les points clés permettant de se rapprocher d'un contact réel.</p>	
MOTS-CLÉS : méthode des éléments discrets, tribologie, triplet tribologique, circuit tribologique, mixture, shuntage, usure, multi-physique, freinage ferroviaire, traitement d'images.	
Laboratoire de recherche :	Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS) UMR CNRS 5259 - INSA de Lyon 27 bis avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne Cedex (FRANCE)
Directeurs de thèse: Yves BERTHIER, Mathieu RENOUF	
Président de jury : Jean DENAPE	
Composition du jury : Jean DENAPE, Caroline RICHARD, Riccardo ARTONI, Yves BERTHIER, Mathieu RENOUF	