N°d'ordre NNT : 2022LYSEI070

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
INSA Lyon

Ecole Doctorale N°EDA162
MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE

Spécialité : **Génie mécanique**

Soutenue publiquement le 18/07/2022, par :
Samy GUIDOUM

Contrôle et efficacité de l'adhérence : application au contact rail-roue

---

Devant le jury composé de :

Kane, Malal	Directeur de recherche	Université Gustave Eiffel	Rapporteur
Desplanques, Yannick	Professeur	École Centrale de Lille	Rapporteur
Gadiou, Roger	Professeur	IS2M Mulhouse	Examinateur
Thiercelin, Léo	Maître de Conférences	ENSAM	Examinateur
Bouscharain, Nathalie	Docteur	INSA Lyon	Examinatrice
Saulot, Aurélien	Professeur	INSA Lyon	Directeur de thèse
Berthier, Yves	Emérite	CNRS	Invité
Delaunay, Alain	Ingénieur	SNCF Réseau	Invité

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	**CHIMIE DE LYON** **https://www.edchimie-lyon.fr** Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage secretariat@edchimie-lyon.fr	**M. Stéphane DANIELE** C2P2-CPE LYON-UMR 5265 Bâtiment F308, BP 2077 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69616 Villeurbanne **directeur@edchimie-lyon.fr**
E.E.A.	**ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE** **https://edeea.universite-lyon.fr** Sec. : Stéphanie CAUVIN Bâtiment Direction INSA Lyon Tél : 04.72.43.71.70 secretariat.edeea@insa-lyon.fr	**M. Philippe DELACHARTRE** INSA LYON Laboratoire CREATIS Bâtiment Blaise Pascal, 7 avenue Jean Capelle 69621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.88.63 **philippe.delachartre@insa-lyon.fr**
E2M2	**ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION** **http://e2m2.universite-lyon.fr** Sec. : Bénédicte LANZA Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	**Mme Sandrine CHARLES** Université Claude Bernard Lyon 1 UFR Biosciences Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69622 Villeurbanne CEDEX **sandrine.charles@univ-lyon1.fr**
EDISS	**INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ** **http://ediss.universite-lyon.fr** Sec. : Bénédicte LANZA Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	**Mme Sylvie RICARD-BLUM** Institut de Chimie et Biochimie Moléculaires et Supramoléculaires (ICBMS) - UMR 5246 CNRS - Université Lyon 1 Bâtiment Raulin - 2ème étage Nord 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 Villeurbanne Cedex Tél : +33(0)4 72 44 82 32 **sylvie.ricard-blum@univ-lyon1.fr**
INFOMATHS	**INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES** **http://edinfomaths.universite-lyon.fr** Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 infomaths@univ-lyon1.fr	**M. Hamamache KHEDDOUCI** Université Claude Bernard Lyon 1 Bât. Nautibus 43, Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne Cedex France Tél : 04.72.44.83.69 **hamamache.kheddouci@univ-lyon1.fr**
Matériaux	**MATÉRIAUX DE LYON** **http://ed34.universite-lyon.fr** Sec. : Yann DE ORDENANA Tél : 04.72.18.62.44 yann.de-ordenana@ec-lyon.fr	**M. Stéphane BENAYOUN** Ecole Centrale de Lyon Laboratoire LTDS 36 avenue Guy de Collongue 69134 Ecully CEDEX Tél : 04.72.18.64.37 **stephane.benayoun@ec-lyon.fr**
MEGA	**MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE** **http://edmega.universite-lyon.fr** Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bâtiment Direction INSA Lyon mega@insa-lyon.fr	**M. Jocelyn BONJOUR** INSA Lyon Laboratoire CETHIL Bâtiment Sadi-Carnot 9, rue de la Physique 69621 Villeurbanne CEDEX **jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr**
ScSo	**ScSo*** **https://edsciencessociales.universite-lyon.fr** Sec. : Mélina FAVETON INSA : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04.78.69.77.79 melina.faveton@univ-lyon2.fr	**M. Christian MONTES** Université Lumière Lyon 2 86 Rue Pasteur 69365 Lyon CEDEX 07 **christian.montes@univ-lyon2.fr**

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

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Résumé

Chaque automne, des incidents liés à la dégradation de l'adhérence du contact rail-roue sont signalés par les conducteurs de trains. Ils sont notamment causés par la présence de feuilles mortes en surface d'un rail. Ils génèrent des problèmes de sécurité, de nombreux retards et se produisent principalement en début et fin de journée. À ces moments, la température de l'air atteint celle du point de rosée créant de l'humidité en surface des rails. Des oxydes réagissant avec les feuilles mortes présentes génèrent des modifications physico-chimiques de ces troisièmes corps. Le passage d'un train sur cette couche organique est à l'origine de sollicitations mécaniques diminuant alors l'adhérence du contact.

L'objectif de cette thèse est alors de proposer une démarche d'étude tribologique, visant à caractériser l'adhérence d'un contact rail-roue, en présence d'un troisième corps externe organique. Pour ce faire, deux axes d'études sont suivis.Le premier consiste en une capitalisation des résultats et limites des principaux travaux de recherche effectués sur ce sujet. Cette étape sert à créer un recueil de données tribologiques, mécaniques, et physico-chimiques. Elle est complétée par des analyses morphologiques de troisièmes corps réels prélevés en voie, à la suite d'une perte d'adhérence. Le second axe d'étude consiste en la réalisation d'une campagne d'essais paramétriques sur le banc d'essais Triboring, tribomètre de type galet-anneau représentatif du contact rail-roue à l'échelle 1/15ème. L'étude des variations d'adhérence est ainsi effectuée en prenant en compte les couplages mécaniques et physico-chimiques liés à l'ajout d'un troisième corps organique. Ces dernières sont notamment mises en évidence au travers d'une analyse de grandeurs mécaniques (facteur de frottement), énergétiques (énergie dissipée par frottement) et spectroscopiques (liaison chimique, composition). Enfin, l'activation de plusieurs débits tribologiques met en exergue des phénomènes répétables modulant les conséquences d'une perte d'adhérence d'un train sur les distances parcourues.

Ce travail de recherche est effectué en partenariat avec SNCF Réseau, à l'aide d'outils pluridisciplinaires (tribologie, mécanique, physico-chimie) couplant l'obtention de données expérimentales (issues de voies réelles et d'essais représentatifs du contact rail-roue) à des analyses tribologiques et physico-chimiques.

Mots-clés : Mécanique des contacts ; Tribologie ; Contact rail-roue ; Adhérence ; Frottement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Abstract

Every autumn, incidents related to the degradation of the adhesion of a wheel-rail contact are reported by train drivers. This is caused especially by the presence of dead leaves on the surface of a rail. They cause security problems and numerous delays occuring mainly at the beginning and end of a day. At these times, the air temperature reaches the dew point temperature, creating moisture on the rail surface. Oxides reacting with the dead leaves on the rails generate physical and chemical changes in this third body. When a train is passing over this organic layer, mechanical stresses are generated decreasing the adhesion of the contact.

The objective of this study is to present a tribological approach aimed at characterising the adhesion of a wheel-rail contact with a third external organic body. To do this, two axes of study are followed.The first one consists in a capitalisation of the results and limits of the most relevant research works carried out on this subject. This is used to create a collection of tribological, mechanical and physico-chemical data. It is completed by morphological analyses of real third bodies taken from tracks following an adhesion loss.The second axis of study consists of carrying out a parametric test campaign on the Triboring test bench, which is a ring-roller type tribometer representative of a wheel-rail contact at a 1/15 scale. The study of adhesion variations is thus carried out by taking into account the mechanical and physico-chemical interactions linked to the addition of a third organic body. The latter are highlighted through an analysis of mechanical (friction factor), energetic (energy dissipated by friction) and spectroscopic (chemical bonding, composition) quantities.

Finally, the activation of several tribological flows highlights repeatable phenomena modifying the consequences of a train's adhesion loss on the distances traveled. This research work is being carried out in partnership with SNCF Réseau, using multidisciplinary tools (tribology, mechanics, physical chemistry) that combine experimental data (from real tracks and representative experiments of the wheel-rail contact) with tribological and physical-chemical analysis.

Keywords : Contact Mechanics ; Tribology ; Wheel–rail Contact ; Adhesion.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Table des matières

Résumé 4

Abstract 6

Introduction générale 13

I État de l'art sur l'adhérence du contact rail-roue 18

I.1 Le transport ferroviaire, entre environnement, sécurité et régularité 19

I.2 Le contact rail-roue, description et fonctionnalités 21

I.2.1 Propriétés matériaux et mécaniques d'une roue ferroviaire 21

I.2.2 Propriétés matériaux et mécaniques d'un rail ferroviaire 28

I.2.3 Le contact rail-roue sec 33

I.2.4 L'évolution des théories du contact roulant 38

I.2.5 Description du contact rail-roue à l'aide d'outils conceptuels 42

I.2.6 Tribologie et troisième corps du contact rail-roue 49

I.3 Généralités sur l'adhérence du contact rail-roue 52

I.3.1 Les notions de patinages et d'enrayages. 53

I.3.2 Les notions d'adhérence et de glissement du contact rail-roue 55

I.4 Etudes bibliographiques de l'adhérence d'un contact rail-roue 58

I.4.1 L'utilisation de retours d'expériences techniques et scientifiques 58

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.4.2 Facteurs influant sur l'adhérence d'un contact rail-roue 61

I.4.3 Etude d'un troisième corps particulier : influence de la végétation et des variations d'hygrométrie relative sur l'adhérence du contact rail-roue 76

I.5 Organisation des travaux de recherche 86

II Du retour d'expérience industriel à la nécessité de reproduire des pertes d'adhérence dans des conditions contrôlées 88

II.1 Positionnement et objectifs des travaux de recherche 89

II.1.1 Limitations actuelles 89

II.1.2 Positionnement des travaux de recherche 92

II.2 Justification des paramètres d'études 95

II.2.1 L'utilisation de retours d'expériences techniques 95

II.2.2 Justification des moyens d'essais et d'analyses 102

II.2.3 Méthodes et outils d'analyse 107

II.3 Etude préléminaire : obtention d'éléments de références portant sur l'analyse morphologique et physico-chimique de troisièmes corps réels 120

II.4 Conclusions 134

III Reproduction expérimentale d'une perte d'adhérence pour des conditions contrôlées : étude d'un cas spécifique 135

III.1 Validation de la reproductibilité des essais 136

III.1.1 Reproductibilité des essais sur le banc d'essai Triboring sans troisième corps externe 136

III.1.2 Reproductibilité des essais sur le banc d'essai Triboring en présence d'un troisième corps externe de type feuilles mortes 137

III.2 Essais d'adhérence avec un troisième corps externe. Application à un taux de glissement de 1% et une hygrométrie relative de 50% 140

III.2.1 Caractérisation des variations monotones d'adhérence 140

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

III.2.2 Caractérisation qualitative des débits tribologiques . . . 142

III.2.3 Conséquences de l'activation de débits de recirculations longitudinaux . . . 145

III.2.4 Analyses mécaniques énergétiques des variations d'adhérence . . . 148

III.3 Conclusions . . . 168

IV Etude paramétrique de l'adhérence d'un contact rail-roue en présence d'un troisième corps externe organique **170**

IV.1 Analyse tribologique paramétrique . . . 171

IV.2 Analyses mécaniques de l'effet de l'hygrométrie relative et du taux de glissement sur l'adhérence d'un contact rail-roue . . . 171

IV.2.1 Essais d'adhérence réalisés sans troisième corps externe . . . 172

IV.2.2 Essais d'adhérence réalisés en présence d'un troisième corps externe . . . 174

IV.3 Analyses énergétiques des variations d'adhérence en présence d'un troisième corps externe organique . . . 185

IV.3.1 Variations de puissances dissipées par frottement . . . 185

IV.3.2 Variations énergétiques de l'adhérence au contact . . . 190

IV.4 Analyses physico-chimiques des troisièmes corps externes . . . 193

IV.4.1 Analyses infrarouges d'échantillons de troisièmes corps externes non introduits dans le contact . . . 194

IV.4.2 Analyses infrarouges d'échantillons de troisièmes corps externes introduits dans le contact . . . 196

IV.5 Conclusions . . . 206

Conclusions générales et perspectives **210**

Table des annexes **218**

A Description du processus de fabrication d'une roue ferroviaire . . . 219

B Processus de fabrication des rails . . . 221

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

C Facteurs de frottement pour un taux de glissement constant et différentes hygrométries relatives 223

D Facteurs de frottement pour une hygrométrie relative constante et différents taux de glissement 226

E Facteurs de frottement cycliques dont les variations sont "non classiques" 228

F Données énergétiques liées aux seuils n°1 et n°4 231

Bibliographie **233**

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Introduction générale

L'une des particularités du transport ferroviaire repose sur le faible besoin énergétique nécessaire au déplacement d'une masse importante. Ce besoin se traduit par une faible résistance au roulement significative de l'existence d'un faible facteur de frottement roue-rail. Une personne peut ainsi pousser manuellement et aisément un essieu pesant plusieurs centaines de kilogrammes sur une voie plane.

L'ordre de grandeur classiquement utilisé [1] pour ce facteur est de 0.3 pour un rail et une roue en acier « propre ». Toutefois, il peut chuter fortement lorsque le rail se pollue par n'importe quel élément chimique ou organique. Cette baisse du facteur de frottement peut survenir toute l'année mais est souvent accentuée en automne avec la chute massive de feuilles, ou bien encore avec les fortes variations de température et d'hygrométrie ; on parle alors d'adhérence dégradée des trains.

Chaque automne, des incidents dus à un manque d'adhérence roue-rail impactent donc la sécurité et la régularité des trains. Ils peuvent par exemple être à l'origine d'un franchissement d'un point protégé (franchissement d'un aiguillage, arrêt hors quai, franchissement d'un signal d'arrêt...) ou d'une impossibilité de mise en mouvement [2].

La présence conjuguée de feuilles mortes écrasées par les roues et l'humidité ambiante génère une pâte végétale (troisième corps organique) sur le rail qui réduit considérablement l'adhérence. Ce type de perte d'adhérence survient lors des phases de freinage (phénomène d'enrayage) et d'accélération d'un train (phénomène de patinage). En 2020, SNCF Réseau a identifié 85 543 minutes perdues en raison de ces problèmes d'adhérence [3]. Pour lutter contre ces pertes de temps, garantir la sécurité et la régularité des circulations, des mesures curatives et préventives sont quotidiennement mises en œuvre. En période automnale, des wagons nettoyeurs de rails sont déployés sur l'ensemble du réseau (figure 1). Ils nettoient et brossent quotidiennement l'ensemble des zones identifiées propices à des pertes d'adhérence.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

FIGURE 1 – Wagon laveurs de rails en fonctionnement. Deux buses (encadré) projettent de l'eau sur la surface des rails avec une pression de 1000 bars [3].

La zone de contact d'une roue sur un rail est d'une surface équivalente à celle d'une pièce de 50 centimes d'euros et peut être soumise à des pressions qui peuvent atteindre plusieurs GPa [4]. Lors d'un mouvement, un effort d'accélération ou de freinage peut atteindre jusqu'à 25% de la charge à l'essieu dans des conditions optimales [5]. En revanche, lorsque les conditions météorologiques (température, hygrométrie...) se dégradent, la transmission de ces efforts peut atteindre 15% de la charge à l'essieu [6]. Dans les cas les plus critiques, il peut arriver qu'en traction ou en freinage, le facteur de frottement chute fortement ; cela a pour conséquence de faire glisser la roue sur le rail et donc de perdre le contrôle d'un train.

Les phénomènes physiques permettant de contrôler l'adhérence du contact rail-roue sont complexes. De nombreuses études (recensées sur [7] et [8]) ont ainsi été menées ces 30 dernières années afin d'identifier les différents mécanismes tribologiques associés à l'adhérence de ce contact. Différentes approches (globales, locales, expérimentales...) ont mis en évidence qu'une variation d'adhérence due à la présence de feuilles mortes au contact pouvait être obtenue par une succession d'états tribologiques, mécaniques et physico-chimiques différents. Ces études peuvent néanmoins faire l'objet d'approfondissements. En effet, les principaux résultats obtenus l'ont notamment été à partir de l'utilisation de banc d'essais ne reproduisant pas exactement les circuits tribologiques du contact. La structure des troisièmes corps utilisés n'est parfois pas représentative d'une situation réelle. Enfin, l'étude de l'influence de l'hygrométrie relative et de différents taux de glissement sur l'adhérence n'est aussi que très peu prise en compte.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Par conséquent, l'objectif de cette thèse est de compléter les différents travaux de recherche portant sur l'adhérence du contact rail-roue, pour un glissement positif, et en présence d'un troisième corps externe organique. Pour cela, ce manuscrit est articulé autour de quatre chapitres :

- Le **chapitre I** est dédié à la réalisation d'une étude bibliographique sur le contact rail-roue. Il présente les enjeux liés à la maîtrise de ses fonctionnalités (propriétés matériaux et mécaniques). Il permettra de tendre vers des notions théoriques et expérimentales définissant les zones d'adhérence et de glissement au contact. Les éléments apportés dans ce chapitre sont complétés par l'utilisation d'outils tribologiques conceptuels [9]. Ces derniers mettent en évidence l'influence de l'ajout d'un troisième corps artificiel et/ou naturel sur les variations d'adhérence du contact. Cette état de l'art est appuyé par différents retours d'expériences industriels.

- Le **chapitre II** est articulé autour de trois axes complémentaires. Le premier sert à contextualiser et positionner les objectifs de ces travaux de thèse par rapport à l'étude bibliographique. Tout particulièrement, l'étude de l'influence de deux paramètres (taux de glissement et hygrométrie relative) sur l'adhérence d'un contact rail-roue en présence de feuilles est justifiée.
  Le second axe permet de montrer que l'utilisation du banc d'essai de type galet sur anneau Triboring répond aux limitations actuelles des études portant sur l'adhérence du contact rail-roue. Ce banc reproduit de façon réaliste ce contact et les circuits tribologiques associés à une échelle 1/15ème. Les outils d'analyses physico-chimiques et mécaniques utilisés au cours de ce manuscrit sont également présentés dans ce chapitre.
  Le troisième et dernier axe de travail présente des résultats d'étude préliminaire visant à caractériser la morphologie de troisièmes corps réels prélevés en voie après une perte d'adhérence. Ces analyses sont utilisées afin de constituer une première base de données servant à valider la reproduction d'un troisième corps réaliste sur le banc Triboring.

- Le **chapitre III** se focalise sur la reproduction expérimentale d'une perte d'adhérence pour une condition d'hygrométrie et de glissement imposée. L'objectif de ce chapitre est de caractériser le fonctionnement du banc Triboring en présence de feuilles (répétabilité et incertitudes de mesure), et de proposer une démarche d'analyse des résultats obtenus. Les données mesurées et calculées sont décrites d'un point de vue mécanique et énergétique. Elles sont corrélées à des observations morphologiques de troisièmes corps expérimentaux ainsi qu'à leur analyse par spectroscopie EDX et infrarouge. Ces résultats sont enfin utilisés pour mettre en évidence l'influence de l'activation de plusieurs débits tribologiques sur la répartition de zones à faible adhérence obtenues expérimentalement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

- Le **chapitre IV** généralise la démarche expérimentale du chapitre III. Une étude paramétrique visant à caractériser l'adhérence du contact rail-roue est réalisée sur Triboring. Pour cela, différentes conditions d'essais (hygrométrie relative du troisième corps et taux de glissement du contact) sont appliquées. Les résultats d'essais de ce chapitre font l'objet de la même procédure d'analyse que celle suivie au cours du chapitre 3. L'ensemble des conditions d'essais permet alors de compléter les résultats issus des couplages mécaniques, tribologiques, et physico-chimiques mis en évidence.

Ces quatre chapitres sont suivis de la conclusion générale et des perspectives associées à l'ensemble de ces travaux de thèse.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre I

État de l'art sur l'adhérence du contact rail-roue

Sommaire

I.1 Le transport ferroviaire, entre environnement, sécurité et régularité 19
I.2 Le contact rail-roue, description et fonctionnalités 21
I.2.1 Propriétés matériaux et mécaniques d'une roue ferroviaire 21
I.2.2 Propriétés matériaux et mécaniques d'un rail ferroviaire 28
I.2.3 Le contact rail-roue sec 33
I.2.4 L'évolution des théories du contact roulant 38
I.2.5 Description du contact rail-roue à l'aide d'outils conceptuels 42
I.2.6 Tribologie et troisième corps du contact rail-roue 49
I.3 Généralités sur l'adhérence du contact rail-roue 52
I.3.1 Les notions de patinages et d'enrayages. 53
I.3.2 Les notions d'adhérence et de glissement du contact rail-roue 55
I.4 Etudes bibliographiques de l'adhérence d'un contact rail-roue 58
I.4.1 L'utilisation de retours d'expériences techniques et scientifiques 58
I.4.2 Facteurs influant sur l'adhérence d'un contact rail-roue 61
I.4.3 Etude d'un troisième corps particulier : influence de la végétation et des variations d'hygrométrie relative sur l'adhérence du contact rail-roue . . 76
I.5 Organisation des travaux de recherche 86

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.1 Le transport ferroviaire, entre environnement, sécurité et régularité

En 2015, l'accord de Paris sur le climat a pu fixer un objectif de maintien de la limitation du réchauffement climatique en dessous de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle. Afin d'y parvenir, l'une des solutions soutenues par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) consiste à développer le transport ferroviaire. En France, le secteur des transports dans son intégralité a été responsable de 31% des émissions de gaz à effets de serre (GES) en 2019 [10]. Le transport ferroviaire peut s'avérer être pertinent pour réduire l'émission de ces gaz et contribuer au respect de l'objectif fixé par l'accord de Paris. En effet, représentant 10% des voyageurs et des marchandises transportés en France [11], les émissions en CO_2 associées à ce mode de déplacement ne comptent que moins de 1% des émissions totales de ce secteur (figure I.1). Un exemple : un train de marchandise émet en moyenne 9 fois moins de CO_2/km qu'un poids lourd pour une même masse transportée.

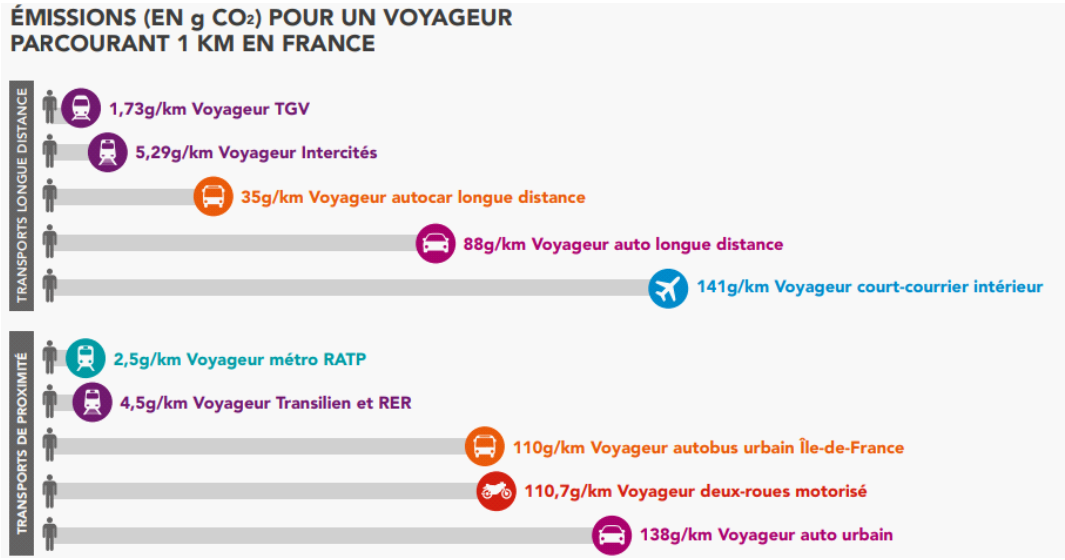
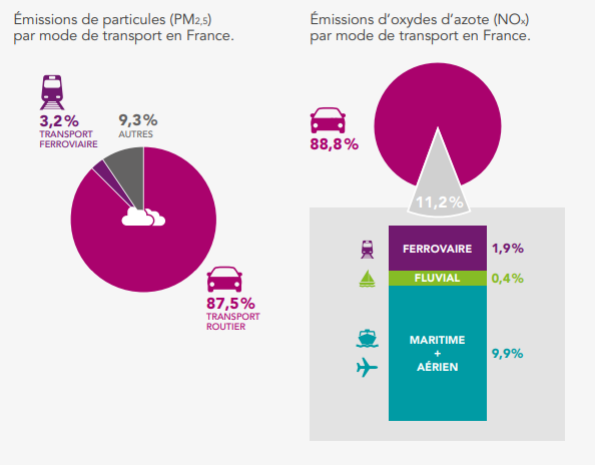


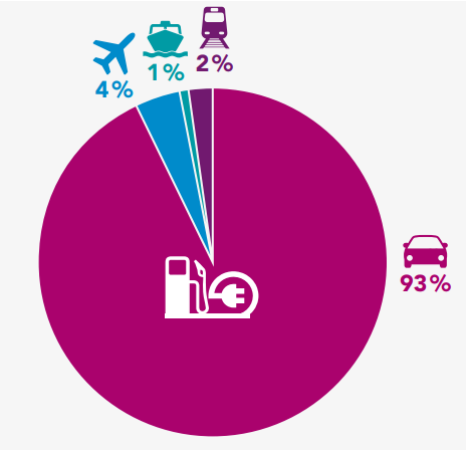
FIGURE I.1 – Émissions de CO_2 par personne : comparatif selon le mode de transport utilisé [11].

L'utilisation du train permet aussi de réduire l'émission de particules fines ($PM_{2.5}$) et d'oxydes d'azote (NO_x) le rendant un mode de transport des moins polluants (figure I.2a) [10]. D'un point de vue énergétique le ferroviaire assure un rendement élevé du fait d'une faible résistance au roulement entre roue et rail en acier dissipant par conséquent moins d'énergie que les autres modes de transport (figure I.2b).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Comparaison des émissions de particules fines et d'oxydes d'azote de différents modes de transport



(b) Consommation énergétique des modes de transports en France.

FIGURE I.2 – Le transport ferroviaire comme outil contre la lutte contre le réchauffement climatique [11].

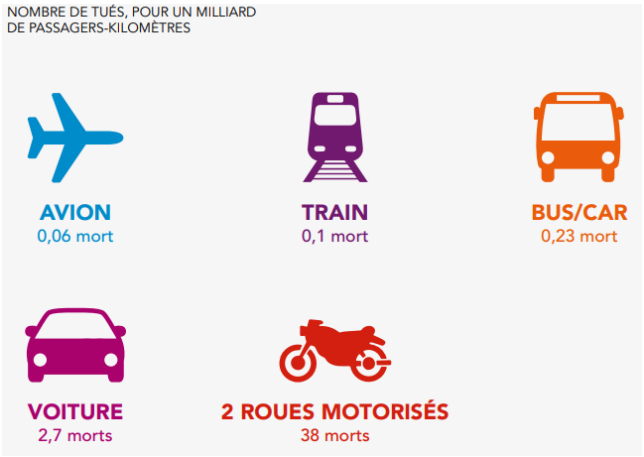


FIGURE I.3 – Sécurité des modes de transport en Europe, nombre de tués pour un milliard de passagers-kilomètres [11].

Le transport ferroviaire rend possible l'acheminement de voyageurs et de marchandises à un niveau de sécurité et de régularité élevé. Ainsi, son utilisation aide à faire baisser l'accidentologie routière et les coûts associés pour la société (figure I.3). Dans les zones fortement peuplées, le respect des horaires de départs et d'arrivés d'une circulation sont synonymes d'un marqueur de la performance et de l'efficacité d'un réseau dans son ensemble.
Le déplacement de personnes et/ou de marchandises doit répondre à des critères de sécurité, de régularité et de respect environnementaux. Il faut ainsi, pour cela, être en mesure de comprendre et de maitriser le contact entre une roue et un rail ferroviaire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.2 Le contact rail-roue, description et fonctionnalités

La compréhension des fonctionnalités d'un contact rail-roue débute par la maitrise du choix des matériaux et des procédés de fabrication des pièces en contact.

I.2.1 Propriétés matériaux et mécaniques d'une roue ferroviaire

I.2.1.1 Les différentes parties d'une roue

Afin d'être en mesure de rouler sur ses rails, la caisse d'un train est montée sur un châssis appelé bogie contenant un groupe d'essieux.

Un bogie est composé de l'ensemble des éléments nécessaires à la mise en marche du train et au confort des passagers (moteurs, freins, amortisseurs, figure I.4).

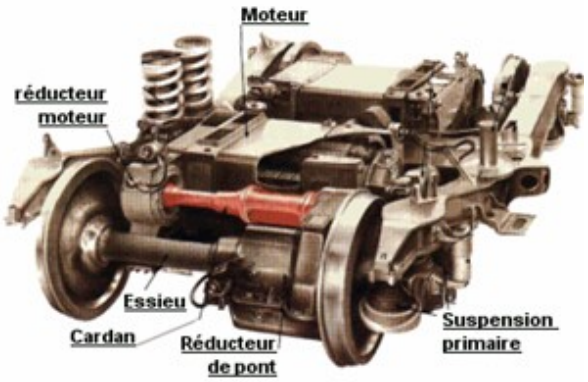


FIGURE I.4 – Couvercle de bogie

Un essieu est formé de deux parties (axe et roue ferroviaire). Leur fabrication, et géométrie sont régies par des normes européennes [12],[13]. Les axes sont principalement fabriqués via forgeage. Les roues suivent quant à elles différents processus de mise en forme (incluant des traitements thermiques) leurs conférant des propriétés mécaniques (limite d'élasticité, dureté, ...) et matériaux souhaitées. Une roue ferroviaire est constituée de plusieurs parties assurant la transmission des efforts et le guidage du train avec le rail. La table de roulement est la zone en contact direct avec le rail (figure I.5). De forme conique, elle assure la transmission des efforts de traction et freinage lors du mouvement d'un train.

Le boudin assure le guidage de la roue lors de la circulation d'un train en courbe ou sur des voies en devers. Il empêche donc le déraillement du train lors d'un passage sur des courbes de rayons serrés (rayon de courbure $<$ 1000m). La jante permet de dissiper l'énergie provenant du freinage des roues par semelles de frein.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

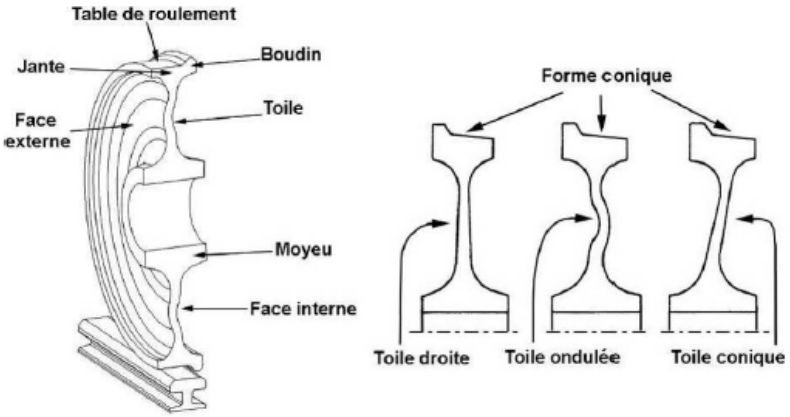


FIGURE I.5 – Vue en coupe des différentes parties de la roue et des principales toiles utilisés. [14]

Enfin, la toile réalise la jonction entre le moyeu et la jante de la roue. En fonction de sa forme, elle se déforme pour transmettre les efforts induits par le contact rail-roue et empêcher les phénomènes de déjettement (translation axiale de la jante par rapport au moyeu de la roue), voir aussi figure I.6.

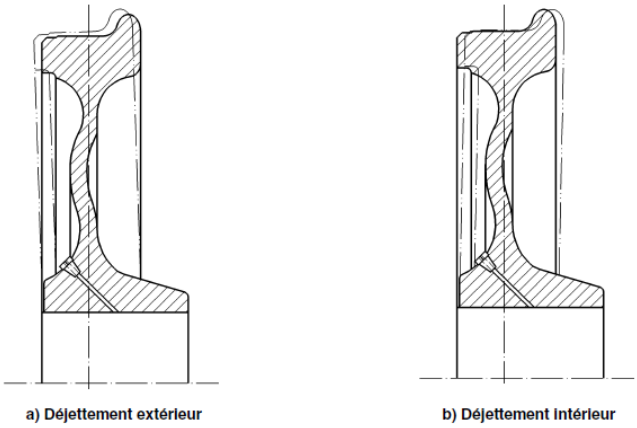


FIGURE I.6 – Illustration du phénomène de déjettement d'une roue ferroviaire. [12]

I.2.1.2 Fabrication d'une roue, de la norme au processus industriel

Les éléments normatifs liés aux processus de fabrication

La fabrication d'un essieu ferroviaire est soumise au respect de la norme NF EN 13262 (Applications ferroviaires, essieux montés et bogies, roues – prescriptions pour le produit). Cette norme donne principalement des informations sur la composition chimique d'une roue, ses caractéristiques mécaniques et ses propriétés matériau. Elle définit quatre nuances d'aciers (ER6, ER7, ER8 et ER9) utilisées pour la fabrication de roues ferroviaires (table I.1).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

	Teneur maximale en % [1]										
Catégorie d'acier	C	Si	Mn	P [2]	S [2] [3]	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr + Mo + Ni
ER6	0,48	0,40	0,75	0,020	0,020	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER7	0,52	0,40	0,80	0,020	0,020	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER8	0,56	0,40	0,80	0,020	0,020	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER9	0,60	0,40	0,80	0,020	0,020	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50

1) Pour des applications particulières, des variations de prescriptions dans les limites des teneurs maximales peuvent être acceptées.

2) Une teneur maximale de 0,025 % peut être convenue à l'appel d'offre et à la commande.

3) Une teneur minimale en soufre peut être convenue à l'appel d'offre et à la commande en fonction du procédé d'élaboration de l'acier afin de se prémunir contre une fragilisation par l'hydrogène.

TABLEAU I.1 – Pourcentages maximaux des éléments définissant les nuances d'aciers à roue [13].

Les teneurs maximales des différents éléments sont sensiblement identiques pour les quatre catégories d'aciers. Seuls les pourcentages maximaux de carbone peuvent varier entrainant par conséquent des changements portant sur les propriétés matériaux et mécaniques d'une roue. Des valeurs minimales de dureté Brinell dans la jante à obtenir jusqu'à 35mm de profondeur sont données dans cette même norme (table I.2).

	Valeur minimale de dureté Brinell	
Catégorie d'acier	Catégorie 1	Catégorie 2
ER6	—	225
ER7	245	235
ER8	245	245
ER9	—	255

TABLEAU I.2 – Valeurs minimales de dureté Brinell à obtenir dans une jante selon la norme NF EN 13262 [13].

I.2.1.3 Aspect matériaux (fibrage, coupe micrographique, cycle de vie, écrouissage, phase blanche)

La fabrication des roues par forgeage/laminage utilisant un acier à 0,5% de carbone permet d'obtenir une structure métallurgique ferrito-perlitique. Du fait des traitements thermiques appliqués, la dureté d'une roue évolue en fonction de l'épaisseur du matériau refroidi durant la trempe. La microstructure peut elle aussi changer du fait de la répartition des contraintes induites par le contact rail-roue lors du roulement.

En sortie de forge et avant traitement thermique, de la ferrite colonnaire compose principalement la roue en cours de fabrication (voir figure I.7). Les différents traitements thermiques

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

appliqués permettront de modifier la microstructure de l'acier.

FIGURE I.7 – Microstructure d'un acier à roue brut de forge.

Plus généralement, les contraintes générées par le contact rail-roue peuvent être supérieures au GPa. Les limites élastiques des matériaux composant le rail et la roue étant dépassées, les déformations plastiques influencent la microstructure observable en surface et dans le volume de la roue.

Les roues ferroviaires sont réalisées en utilisant des nuances d'aciers contenant entre 0,48 et 0,60% de carbone. Dans certains cas, de la ferrite aciculaire peut aussi être retrouvé en fonction de la nuance utilisée (voir figure I.8).

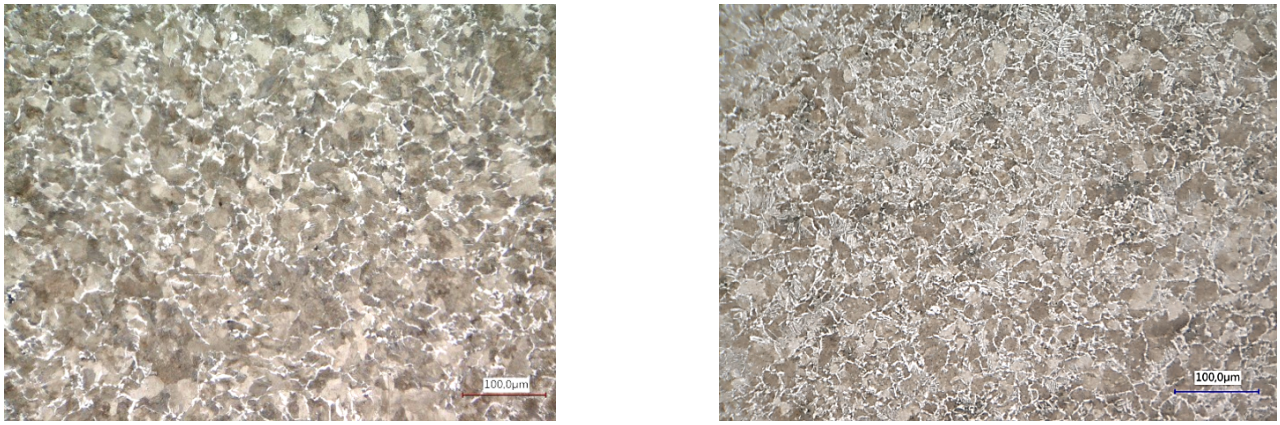


FIGURE I.8 – A gauche, micrographie d'une roue à une distance de 30 mm depuis la surface. A droite, microstructure dans le volume d'une roue composé de ferrite aciculaire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Au fur et à mesure de la vie d'une roue, un écrouissage en surface va être réalisé. Ce dernier étant la conséquence de l'application de pression engendrant des déformations plastiques dans le volume du solide (voir figure I.9).

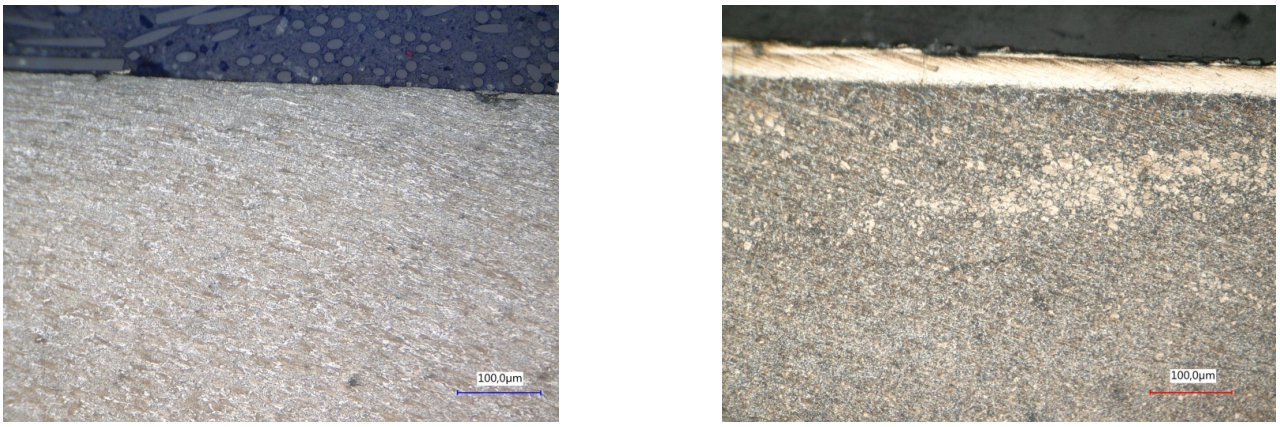


FIGURE I.9 – Écrouissage généré lors de l'utilisation d'une roue ferroviaire. Sur l'image de droite, une transformation tribologique superficielle liée à une augmentation de température faisant suite à un freinage est apparue. Cette phase est qualifiée de "Phase blanche" et est à l'origine de défauts métallurgiques fissurant associés aux roues et rails ferroviaires [15].

Cet écrouissage lié à un cisaillement des interfaces, peut être visible sur des longueurs pouvant varier de la centaine de micron à la vingtaine de millimètres. Elle peut aussi dans certains cas être accompagnée de phase blanche (phase martensitique dont la dureté est élevée à l'origine de défauts fissurant).

La dureté d'une roue varie en fonction des sollicitations qu'elle rencontre. En surface, l'écrouissage présent augmente la dureté mesurée. Dans le cœur du matériau (situé à une distance où la microstructure est homogène), la dureté diminue.

Pour des nuances ER7, les duretés varient entre donc en fonction du cycle de vie et de l'usure d'une roue. Des valeurs diffusées à titre d'exemple sont visibles sur la figure I.10.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

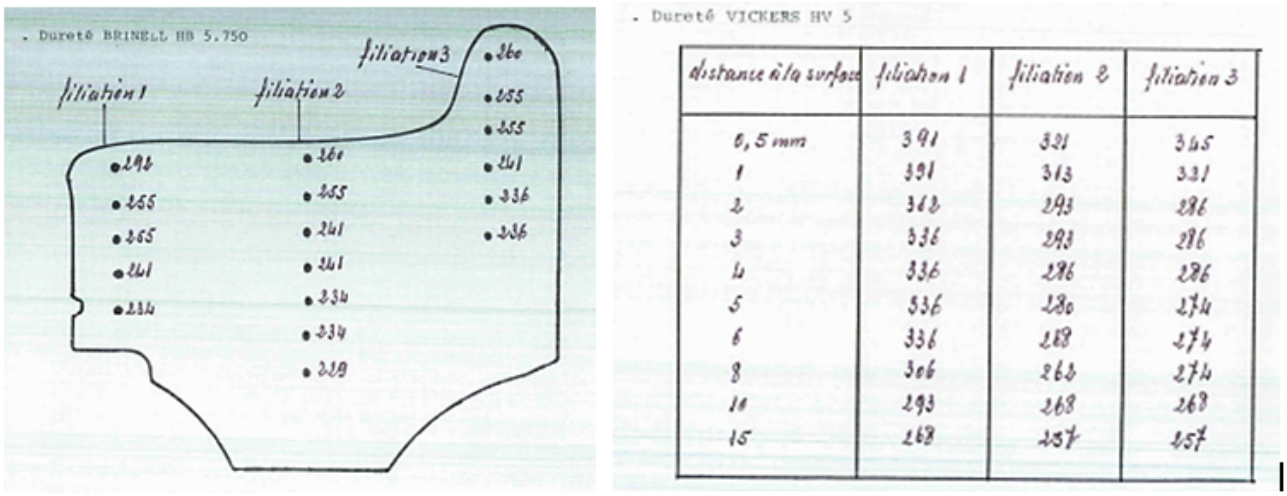


FIGURE I.10 – Exemple de mesure de dureté sur roue usagée de nuance ER7 [16].

Le procédé de fabrication par forgeage (annexe A) permet d'obtenir un fibrage parallèle à la table de roulement de la roue entrainant une anisotropie du solide. Ce dernier peut être visible après attaque du métal par utilisation du réactif de Fry.

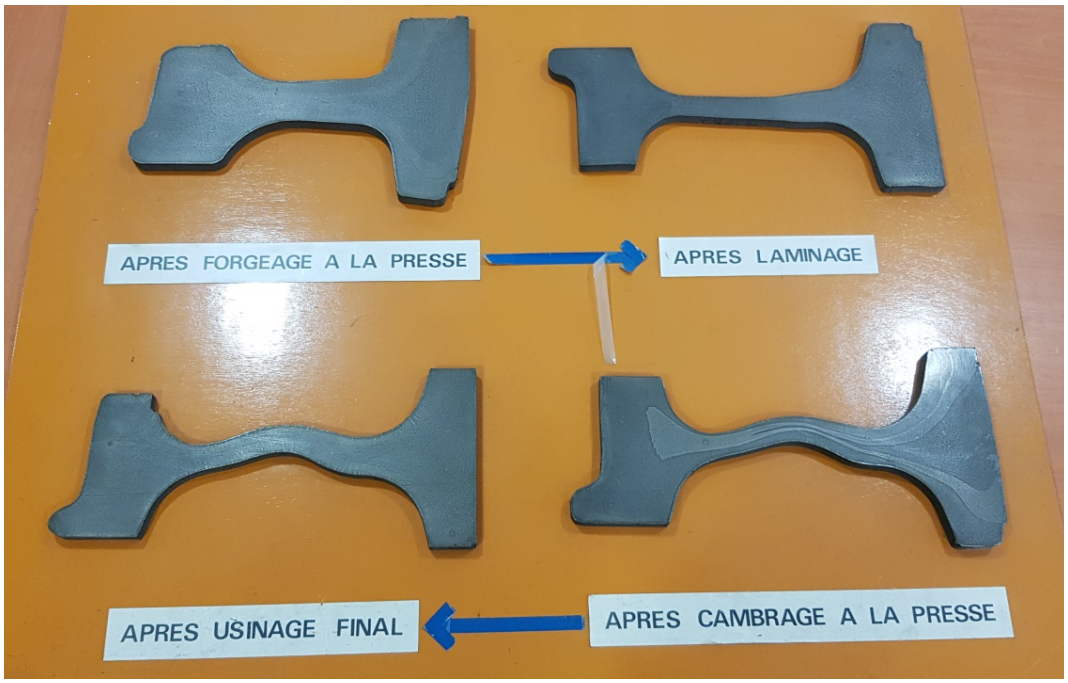


FIGURE I.11 – Aperçu des profils de roues obtenus après différentes étapes de fabrication [17].

En sortie de presse, le fibrage commence à être visible, voir figure I.11. Sa forme évoluera en fonction des différentes étapes de mise en forme appliquées à la roue en cours de fabrication.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

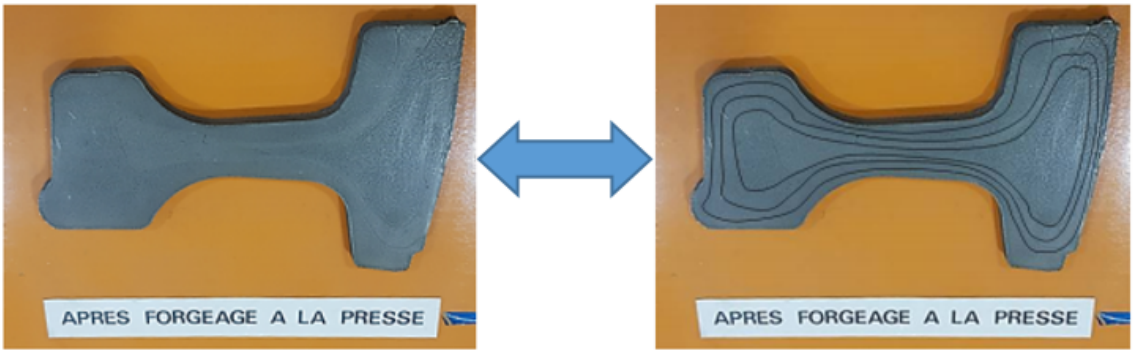


FIGURE I.12 – Exemple de fibrage obtenu après forgeage à la presse et attaque du solide au réactif de Fry d'une roue de nuance ER7. Sur l'image de droite, la forme du fibrage obtenue est schématisée par des traits de couleurs noirs.

Les étapes suivantes de fabrication (laminage/cambrage en presse/usinage) conservent la forme globale de ce fibrage. Ainsi, lorsque la roue est en fonctionnement, le fibrage est transverse à la surface d'un rail.

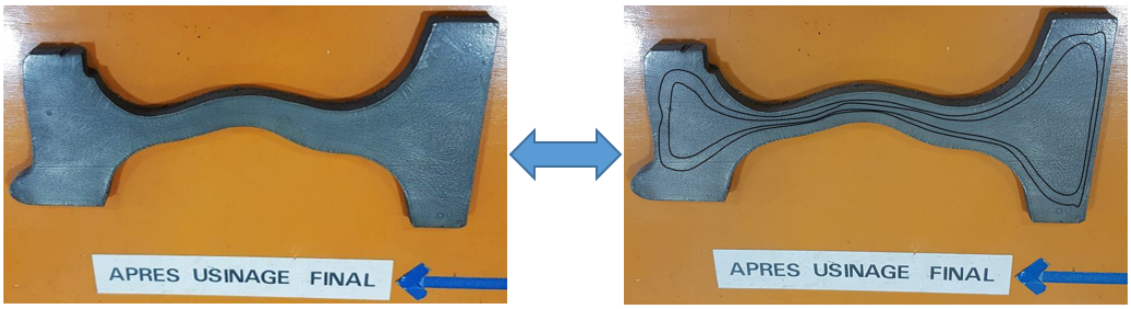


FIGURE I.13 – Schématisation du fibrage après usinage final d'une roue.

La fabrication d'une roue ferroviaire repose sur des procédés industriels particuliers engendrant une maîtrise des propriétés mécaniques et matériaux spécifiées sur les normes de fabrication et d'usages de ces pièces. Sur le même principe, la fabrication de rails repose sur le respect de normes ayant pour but de garantir la sécurité d'une circulation ferroviaire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.2.2 Propriétés matériaux et mécaniques d'un rail ferroviaire

I.2.2.1 Généralités

Les rails utilisés pour la circulation de trains ont des propriétés mécaniques et matériaux adaptées aux circulations rencontrées. Deux principaux types de rails existent, les rails "vignoles" (développés par Charles Vignoles, ingénieur anglais ayant vécu entre 1793 et 1875), utilisés depuis le début du chemin de fer moderne (début du 19ème siècle), et les rails à gorges, utilisés principalement sur des réseaux de tramway. Ces derniers sont utilisés lorsqu'un ancrage des voies dans un enrobé béton est nécessaire (cela est le cas en ville). Nous nous intéresserons ici aux rails vignoles.

I.2.2.2 Constitution d'un rail vignole

Un rail est composé de trois principales parties : le champignon, l'âme et le patin (respectivement « head », « web », « foot » en anglais). Il supporte l'ensemble du poids d'un train sur de toutes petites surfaces de contact. À titre d'illustration, la zone de contact d'une roue posée sur un rail à une surface équivalente à celle d'une pièce de 1€.

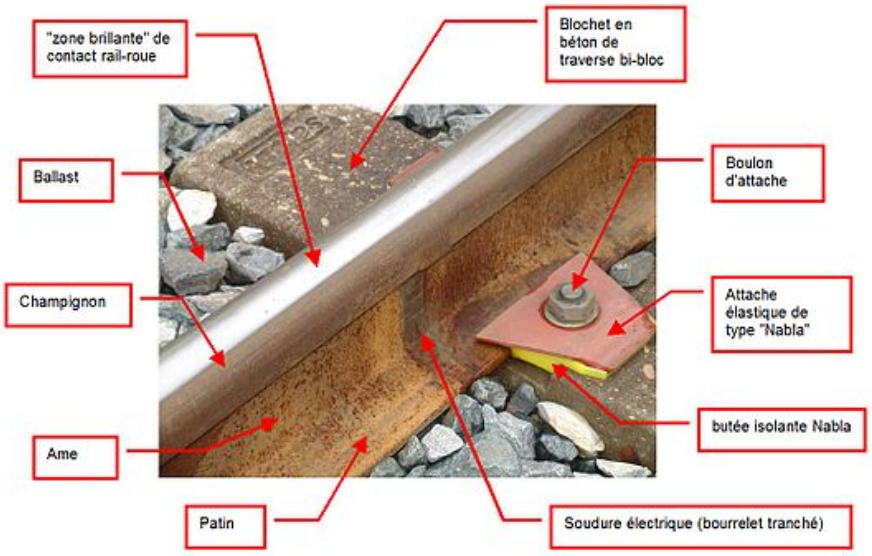


FIGURE I.14 – Différentes parties d'un rail vignole encrée sur un blochet béton [18].

En plus de cette fonction support, le rail, du fait de sa géométrie, assure le guidage des trains. Il permet par exemple au boudin d'une roue de s'appuyer sur l'une des faces latérales du champignon lors du passage du train sur une courbe de rayon serré (R<1000m).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

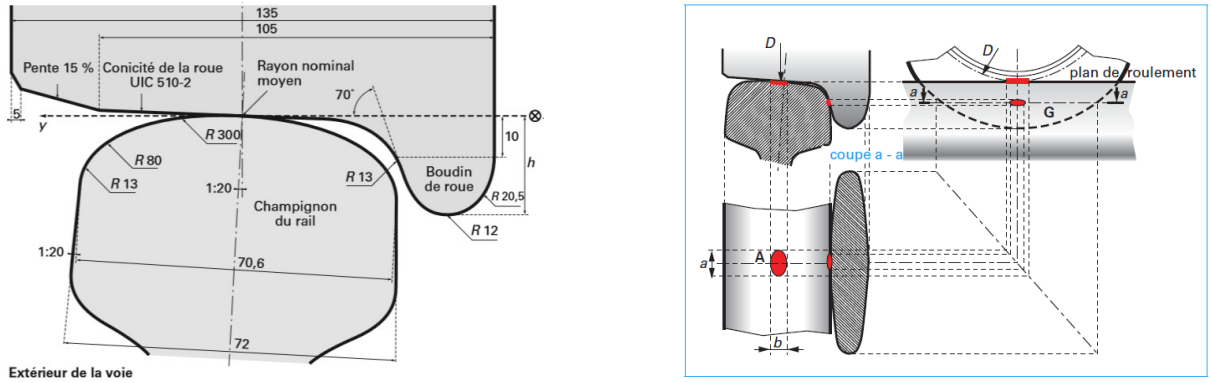


FIGURE I.15 – Inscription d'une roue lors d'une circulation en courbe [19].

Le roulement d'une roue sur un rail s'effectue sur la surface du champignon. Cette dernière peut être dotée d'une courbure ayant un rayon pouvant aller jusqu'à 300mm. Cette courbure est retrouvée sur la jante de la roue, et permet aussi de réaliser le guidage d'un train. Le patin sert à la fixation/l'ancrage du rail sur les traverses en bois ou en béton armé reposant sur la couche de ballast servant à garantir la stabilité de la voie.

Différentes nuances d'aciers sont utilisées dans la fabrication d'un rail. Les principales nuances utilisées sont les R200, R260 et R350HT ayant respectivement des duretés Brinell minimales de 200, 260, et 350. Les nuances de rails R350HT sont traitées thermiquement et sont principalement destinées pour des voies fortement chargées, ou bien encore des voies ayant des courbes de rayon inferieur à 3000m [20]. Les spécificités de ces nuances sont présentées en partie I.2.2.3.

I.2.2.3 Norme de fabrication et de contrôle d'un rail vignole

La composition, les propriétés mécaniques et métallurgiques liées à la fabrication de rails vignoles sont données par la norme NF EN 13674 (Applications ferroviaires Voie — Rails Partie 1 : Rails vignole de masse supérieure ou égale à 46 kg/m) [21].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau 1 — Nuances d'acier

Nuance d'acier [a]		Fourchette de dureté (HBW)	Désignation	Marquage en relief
Nom de l'acier	Numéro d'acier			
R200	1.0521	200 à 240	Non allié (C-Mn) Non traité thermiquement	Aucun marquage
R220	1.0524	220 à 260	Non allié (C-Mn) Non traité thermiquement	———
R260	1.0623	260 à 300	Non allié (C-Mn) Non traité thermiquement	— ———
R260Mn	1.0624	260 à 300	Non allié (C-Mn) Non traité thermiquement	——— ———

TABLEAU I.3 – Exemple de nuances d'aciers à rail données par la norme NF EN 13674 [21].

La composition chimique des trois principales nuances de rails utilisées sur le réseau ferroviaire français sont visibles sur le tableau I.4.

Nuance de d'acier		% en masse									10^{-4} % (ppm) en masse max.		Résistance à la traction R_m min.	Allongement A min.	Dureté au milieu de la table de roulement [c]
Désignation	Échantillon	C	Si	Mn	P max.	S max.	Cr	Al max	V max	N max	O [a]	H [b]	MPa	%	HBW
R200	Liquide	0,40 à 0,60	0,15 à 0,58	0,70 à 1,20	0,035	0,035	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009	20	3,0			
	Solide	0,38 à 0,62	0,13 à 0,60	0,65 à 1,25	0,040	0,040	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010	20	3,0	680	14	200 à 240
R350HT	Liquide	0,72 à 0,80	0,15 à 0,58	0,70 à 1,20	0,020	0,025	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009	20	2,5			
	Solide	0,70 à 0,82	0,13 à 0,60	0,65 à 1,25	0,025	0,030	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010	20	2,5	1 175	9	350 à 390
R260	Liquide	0,62 à 0,80	0,15 à 0,58	0,70 à 1,20	0,025	0,025	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009	20	2,5			
	Solide	0,60 à 0,82	0,13 à 0,60	0,65 à 1,25	0,030	0,030	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010	20	2,5	880	10	260 à 300

TABLEAU I.4 – Composition chimique et caractéristiques mécaniques de trois nuances d'acier à rails issues de la norme NF EN 13674 [21].

Les teneurs en carbone des trois nuances mentionnées indiquent que l'acier formé après fabrication peut être composé de trois types de microstructure ; ferrite, perlite, ou cémentite (le seuil eutectoïde à 0,77% de carbone peut être dépassé pour un rail de nuance R350HT ou R260).

Ce taux de carbone va fortement influencer les caractéristiques microstructurales et mécaniques de l'acier fabriqué. Cela peut notamment être constaté via l'observation des caractéristiques de résistance à la traction, d'allongement minimal et de dureté au centre de la table de roulement.

L'ajout d'éléments d'addition comme le silicium ou le manganèse va permettre d'obtenir une plus grande résistance à la traction, une plus grande limite élastique, ou bien encore une meilleure résistance à l'usure. Il est aussi à noter que le manganèse présent dans ce matériau améliore la ténacité de l'acier fabriqué.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

La norme NF EN 13674 [21] donne aussi des indications sur des valeurs de dureté à obtenir pour chacune des nuances de rails laminés, voir tableau I.5. Il est à noter que les plages de dureté peuvent varier du simple au double et donc modifier les propriétés mécaniques du rail.

Position	Nuance d'acier du rail						
	R200	R220	R260, R260Mn	R320Cr	R350HT, R350LHT	R370CrHT	R400HT
Dureté (2.5 HBW)							
RS [a]	200 à 240	220 à 260	260 à 300	320 à 360	350 à 390 [b]	370 à 410 [c]	400 à 440 [d]
1	e	e	e	e	≥ 340 min	≥ 360	≥ 390
2					≥ 331 min	≥ 350	≥ 380
3					≥ 321 min	≥ 340	≥ 370
4					≥ 340 min	≥ 360	≥ 390

[a] RS est le point central de la surface de roulement.

[b] Si la dureté dépasse 390 HBW, le rail est acceptable, à condition de confirmer que la microstructure est perlitique et que la dureté n'excède pas 405 HBW.

[c] Si la dureté dépasse 410 HBW, le rail est acceptable, à condition de confirmer que la microstructure est perlitique et que la dureté n'excède pas 425 HBW.

[d] Si la dureté dépasse 440 HBW, le rail est acceptable, à condition de confirmer que la microstructure est perlitique et que la dureté n'excède pas 455 HBW.

[e] Non applicable.

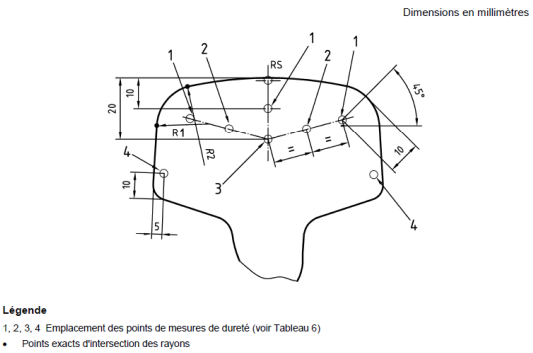


TABLEAU I.5 – Exigences de dureté Brinell et localisation des mesures de contrôle à effectuer données selon la norme NF EN 13674 [21].

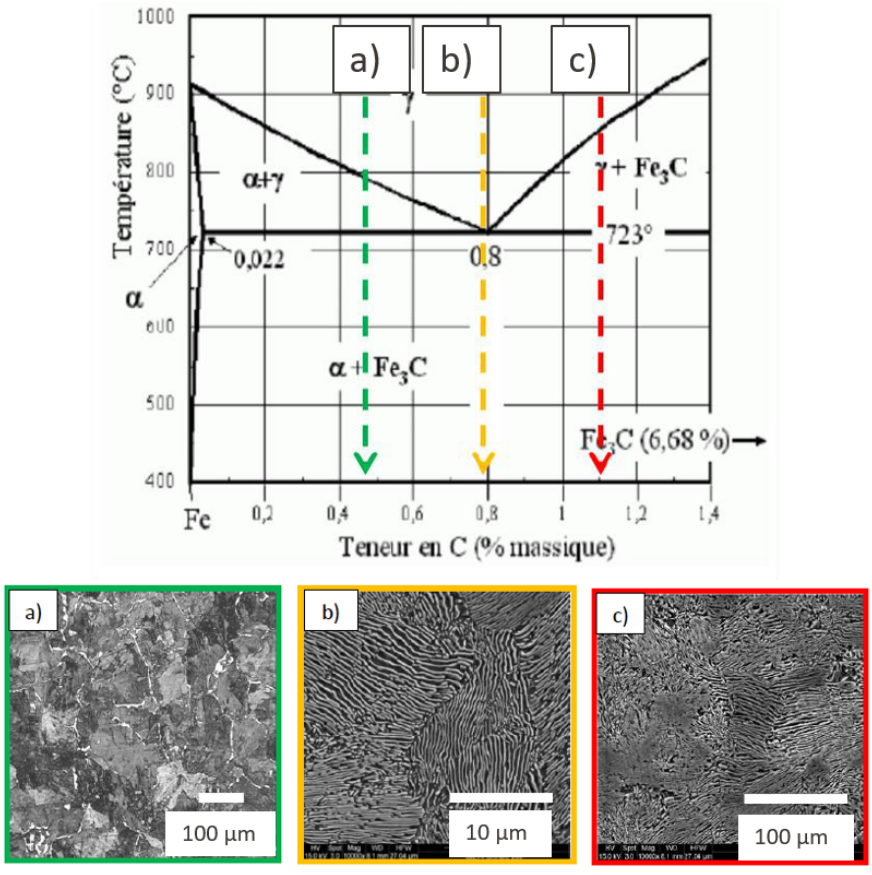


FIGURE I.16 – Diagramme de transformation des aciers à rails, micrographies d'acier (a) hypoeutectoïde (R220), (b) eutectoïde (R260) et (c) hypereutectoïde (R400HT) [22].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Les aciers de nuance R260 possèdent une teneur en carbone proche de 0,8%. Ce sont donc des aciers eutectoïdes ayant une structure entièrement perlitique lamellaire. Les aciers de nuance R200 ont une teneur en carbone inférieure au seuil eutectoïde et vont avoir une structure ferrito-perlitique. Enfin, les aciers à rail hypereutectoïdes vont avoir une structure composée de perlite et de cémentite primaire. La figure I.16 illustre ces propos. Sur le réseau français, les aciers perlitiques sont donc principalement utilisés.

Les nuances d'aciers à rails sont composées d'un pourcentage de carbone pouvant varier entre 0,38% (seuil minimal pour la nuance R200) et 1,07% (seuil maximal pour la nuance R400HT). L'étape de chauffage précédent le laminage du bloom influe sur la microstructure du rail. En surface, la microstructure du rail est une combinaison de ferrite et perlite. A contrario, la masse/cœur (bulk) du matériau est composée de colonies de perlite formées par une alternance de ferrite et de lamelles de cémentite (voir aussi I.17).

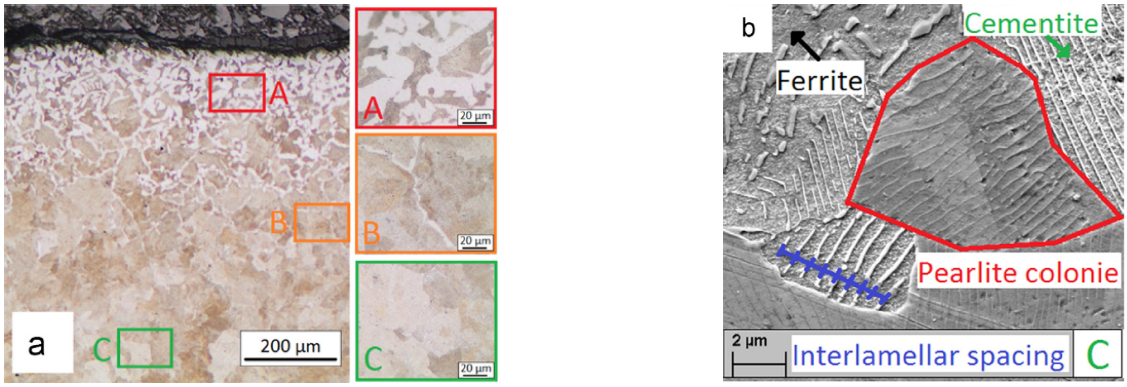


FIGURE I.17 – (a) Micrographie optique de la surface décarburée d'un rail de nuance R260 neuf non meulé (phase claire : proeutectoïde ferrite, constituants foncés : perlite), (b) Micrographie de la zone C du rail [23].

La microstructure en surface du rail n'est pas identique sur l'ensemble du champignon, et peut être influencée par l'accumulation de tonnage vu en surface du rail, la localisation de l'essieu sur la table de roulement lors du passage du train.

La dureté dans le volume du champignon varie entre autres en fonction de la profondeur, du type de circulation, ou bien encore de l'inscription en courbe/alignement imposée par le tracé de la voie. Un rail usagé va alors être écroui en sa surface du fait des déformations plastiques imposées par les fortes pressions du contact rail/roue. L'écrouissage influe sur la taille des grains et provoque une augmentation de dureté dans la zone déformée. Les processus de fabrication d'un rail ferroviaire permettant d'obtenir ces caractéristiques sont visibles en annexe B.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

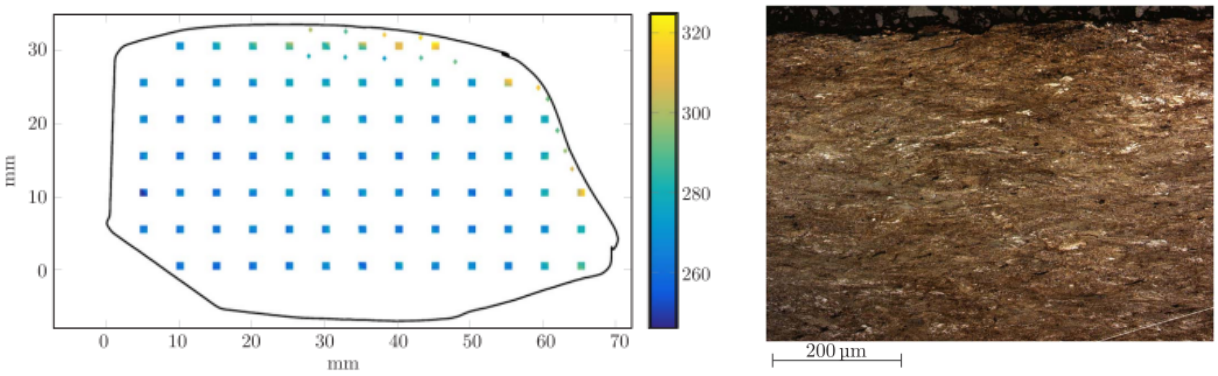


FIGURE I.18 – À gauche, dureté HV10 mesurée dans le champignon d'un rail de nuance R260, à droite, aperçu de la surface déformée sur la joue active du rail [24].

Ainsi, afin de comprendre les enjeux liés à la maitrise des fonctionnalités du transport ferroviaire, l'interaction entre rail et roue est présenté dans la suite de ce document.

I.2.3 Le contact rail-roue sec

Lorsqu'un train circule sur ses rails, les mouvements de caisse (ou de ses wagons) sont atténués par des systèmes de type ressorts/amortisseurs. Des effets dynamiques influençant les efforts normaux et tangentiels au contact sont alors générés par les différents degrés de liberté d'un train [25][26].

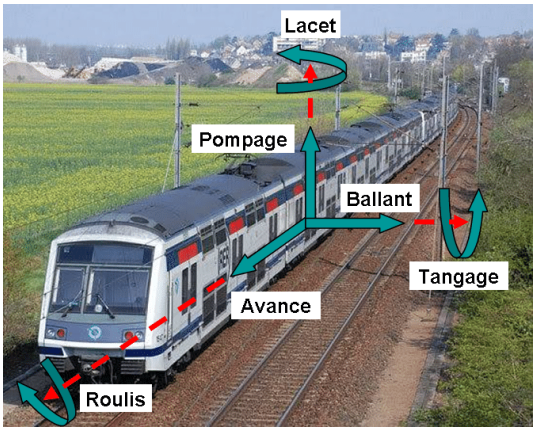


FIGURE I.19 – Définition des degrés de liberté d'un train [26].

L'étude du contact rail-roue peut ainsi être divisé en un problème normal et tangentiel. Le problème normal permet d'obtenir la répartition du champ de pression induit par la présence d'un effort normal au contact. Le problème tangentiel permet quant à lui de déterminer la répartition

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

des efforts tangentiels, des zones d'adhérence et des zones de glissement au sein de l'ellipse de contact. Ces deux problèmes sont explicités ci-après.

I.2.3.1 Le problème normal

L'étude du contact rail-roue se base sur des notions développées dès la fin du XIXème siècle par Hertz [27]. Ce dernier a été à l'origine d'une théorie grâce à laquelle il est possible de déterminer analytiquement la forme d'un contact ainsi que le champ de pression associé pour différentes géométries.

Les résultats obtenus par Hertz ne sont valables que sous certaines hypothèses :

- Les solides ont des surfaces assimilables à des surfaces de second degré, continues, et non-conformes.
- Les matériaux composant les solides en contact ont des comportements linéaires élastiques et isotropes.
- Les dimensions du contact sont petites devant les dimensions et rayons de courbure des corps en contact.
- Aucun frottement ni lubrifiant n'est présent au sein du contact. Les deux corps n'ont pas de mouvements relatifs. Aucun effort tangent n'est transmis.

La géométrie des roues et rails en contact dépendent de normes explicitées en partie I.2. De ce fait, ces deux éléments peuvent être modélisés comme deux surfaces de second degré en contact (figure I.20).

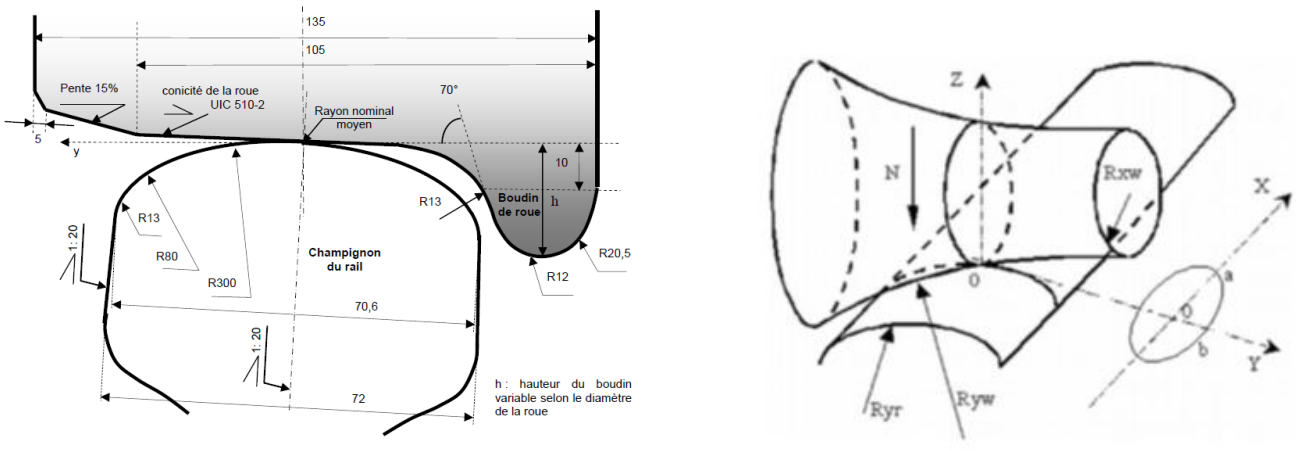


FIGURE I.20 – Profil du champignon d'un rail et d'une table de roulement de roue [5]. Modélisation hertzienne du contact [28].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Lors d'un contact statique, roue et rail peuvent être assimilés à des surfaces de second degré. En exerçant un effort (noté 'N', voir figure I.20) selon la normale au contact ('Z'), une surface elliptique est générée. Ses dimensions dépendent des propriétés matériaux et de la géométrie des pièces en contact, ainsi que de l'effort normal exercé.

Selon [27], l'ellipse de contact est caractérisée par un demi grand axe 'a' et un demi petit axe 'b' obtenus grâce aux expressions suivantes :

$$a = m\left(\frac{3}{2}N\frac{1-\nu^2}{E}\frac{1}{A+B}\right)^{\frac{1}{3}}; \qquad b = n\left(\frac{3}{2}N\frac{1-\nu^2}{E}\frac{1}{A+B}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{I.1}$$

Avec :

m, n Coefficients de Hertz.

A, B Coefficients relatifs à la géométrie de la roue et du rail.

E, ν Module d'Young et coefficient de Poisson.

Le champ de pression et la valeur maximale de pression (dite « Pression de Hertz ») dans le contact peuvent être déterminés par les expressions suivantes [7] :

$$p(x,y) = P_h\sqrt{1-\left(\frac{x}{a}\right)^2-\left(\frac{y}{b}\right)^2} \qquad avec \qquad P_h = \frac{3N}{2\pi ab} \tag{I.2}$$

Ainsi, en considérant les valeurs suivantes issues de [29] :

- N = 70 – 110 kN (Chargement pour une roue et non un essieu)
- E = 210 GPa
- ν = 0.25 - 0.3
- Rwx = 0.3 – 0.65 m
- Rrx = ∞
- Rwy = 0.5 – 0.9m
- Rry = 0.3m

Les demi-axes de l'ellipse de contact obtenus après calculs sont les suivantes : a≈6-8 mm ; b≈5-7 mm et Ph≈1-1.5 GPa. Les valeurs correspondent respectivement aux demi-longueurs, demi-largeur et pression maximale au contact.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Les valeurs obtenues sont à nuancer du fait des hypothèses posées en début de partie. Les hypothèses sur les matériaux des pièces en contact et leurs géométries sont généralement respectées. Néanmoins, ces types de contacts ferroviaires sont roulants et glissants, par conséquent, des efforts tangents (longitudinaux et/ou transversaux) sont présents. Toutefois, il est admis lors de la réalisation d'études du contact rail-roue que les problèmes normal et tangentiel peuvent être étudiés séparément [25].

I.2.3.2 Le problème tangentiel

Johnson [28] explicite en 1985 l'idée selon laquelle deux types d'interactions physiques existent dans un contact : transmission d'efforts et mouvements relatifs. Il est ainsi possible de définir dans un repère tangent aux surfaces en contacts un torseur des actions mécaniques transmissibles. Généralement, seules les forces normales et tangentielles ainsi que les moments normaux aux surfaces sont considérés. Les autres composantes de ce torseur sont souvent négligées (elles sont petites devant les autres éléments).

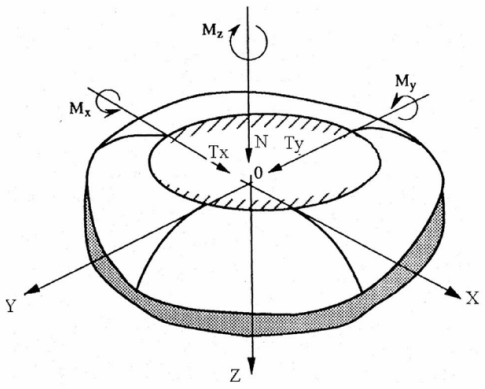


FIGURE I.21 – Torseur des efforts transmissibles dans un contact [28].

La figure I.21 permet de mettre en évidence les efforts et moments transmis au sein d'un contact. Dans le cas du contact rail-roue, et en un point quelconque de la surface de contact, plusieurs mouvements existent :

- pivotement défini par le rapport du moment normal (Mz) sur la force normale (N),
- roulement défini par le rapport d'un moment tangentiel (Mx ou My) sur la force normale,
- glissement défini par le rapport d'une force tangentielle (Tx ou Ty) sur la force normale.

En pratique, les moments tangentiels sont assez faibles devant les efforts transmis. Seul le moment normal à l'origine du mouvement de pivotement est considéré dans l'expression des forces [7].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans le cas du contact rail/roue, la géométrie des pièces associée aux efforts transmis sont à l'origine de mouvements relatifs liés aux pièces en contact. Ils sont définis par des glissements en translation longitudinaux ν_x, transversaux ν_y, et en rotation ν_z (créant un mouvement de spin autour de l'axe normal à l'ellipse de contact). Ils sont déterminés par les expressions suivantes et associés aux notations visibles sur la figure I.22 :

$$\nu_x = \frac{V_r - V_a}{V_a} \qquad \nu_y = tan(\phi) \simeq \phi \text{ (pour} \phi \text{ petit)} \qquad \nu_z = \frac{\omega\sqrt{(ab)}}{V_a} \tag{I.3}$$

avec :

ν_x : Glissement longitudinal.

ν_y : Glissement transversal.

ν_z : Glissement en rotation induisant un mouvement de spin dans le contact.

V_r : Vitesse linéaire de la roue.

V_a : Vitesse d'avance de la roue.

ϕ : Angle défini entre V_a et V_r.

a, b : Demi-longueur et demi-largeur de la zone de contact.

ω : Vitesse angulaire.

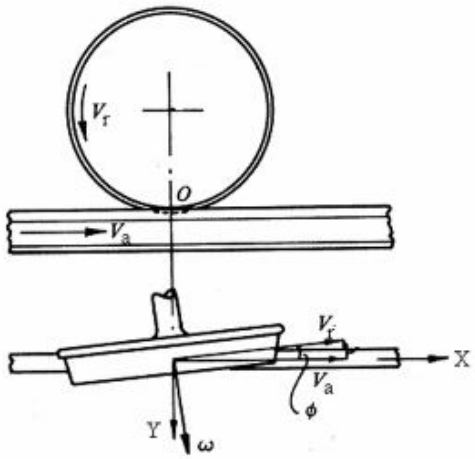


FIGURE I.22 – Mouvements relatifs présents dans un contact rail-roue [28].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.2.4 L'évolution des théories du contact roulant

La théorie de Hertz permet d'obtenir un ordre de grandeur des valeurs de pressions liées au contact entre deux solides sans la présence de frottement. Ainsi, afin de pouvoir déterminer les efforts transmis et les mouvements relatifs dans le cas d'un contact roulant avec frottement, différentes théories ont été développés autour de la théorie de Carter [30] depuis le $XX^{ème}$ siècle.

I.2.4.1 La théorie de Carter

Carter montra expérimentalement dès 1926 la présence de zones d'adhérence et de glissement dans un contact roulant avec frottement. Pour cela, il approxima le roulement d'une roue sur un rail par celui d'un cylindre sur un massif plan semi-infini. Ainsi, l'obtention des efforts normaux et tangentiels en présence de frottement peut être effectué dans ce cas correspondant à celui d'un contact linéique en deux dimensions.

De plus, la présence d'un glissement longitudinal ν_x est aussi mis en évidence lorsque la roue est soumise à une accélération ou une décélération. Ce glissement correspond à une différence de vitesse non nulle entre la vitesse linéaire de la roue (Va) et la vitesse d'avance du train (Va). Il évolue avec le couple moteur appliqué à la roue et générant un effort tangentiel à l'interface rail-roue. Tant que cet effort tangentiel (noté T_x) reste inférieur à une limite donnée par un critère de frottement défini par Coulomb [31], la théorie donnée par Carter s'écrit alors :

$$\frac{T_x}{\mu N} = \begin{cases} -k\gamma + 0.25k^2\gamma|\gamma| & k|\gamma| \leq 2, \\ -sign(\gamma) & k|\gamma| \geq 2 \text{ avec} \qquad \gamma = 2\left(\frac{Vr-Va}{Vr+Va}\right). \end{cases} \tag{I.4}$$

Tx : Effort tangentiel longitudinal de contact.

N : Effort normal de contact.

μ : Coefficient de frottement de Coulomb.

γ : Taux de glissement.

k : Coefficient de glissement de Carter.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.2.4.2 Le glissement au contact

Le taux de glissement défini dans l'équation (I.4) correspond au ratio entre la vitesse de glissement (Vr-Va) et la vitesse de roulement $\frac{Vr+Va}{2}$. Plus généralement, la formule donnant un taux de glissement en tribologie est sensiblement différente :

$$\gamma = \frac{Vr - Va}{|Vr| + |Va|} \qquad \text{avec } \gamma \in \text{[-1,+1]} \tag{I.5}$$

En considérant une roue de rayon R mise en mouvement à une vitesse angulaire ω, l'équation (I.6) devient :

$$\gamma = \frac{\omega R - Va}{|\omega R| + |Va|} \qquad \text{avec } \gamma \in \text{[-1,+1]} \tag{I.6}$$

Ainsi, plusieurs cas de figures peuvent être obtenus :

- $\gamma = 0$: Cas d'un roulement sans glissement, les vitesses des roues et du train sont identiques
- $\gamma = 1$: Patinage du train, la vitesse d'avance du train devient négligeable devant la vitesse de rotation des roues.
- $\gamma =$ -1 : Enrayage du train, la roue est bloquée en rotation(Vr=0) quand dans le même temps le train continue à se déplacer (Vr$\neq$0).

Carter démontre aussi expérimentalement la présence de zones de glissement et d'adhérence dépendant de l'évolution du glissement longitudinal présent. Ces résultats sont obtenus par photoélasticimétrie [32] sous les hypothèses suivantes :

— l'inertie des corps en contact est négligeable,
— les surfaces sont lisses et non contaminées,
— les vitesses d'avances sont très faibles (essais statiques).

Théoriquement, ces résultats peuvent être obtenus en superposant les contraintes tangentielles notées $q_1(x)$ et $q_2(x^*)$ correspondant aux cas de non glissement et de glissement complet, voir figure I.23. Ces premiers résultats ont pu être étendus aux cas des contacts circulaires avec présence de glissement au contact.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

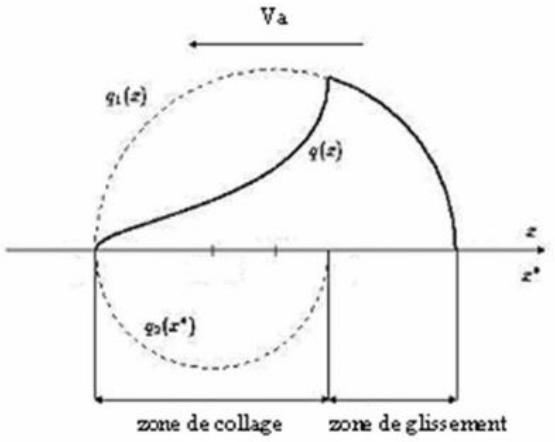


FIGURE I.23 – Répartition des contraintes tangentielles en présence d'un glissement longitudinal [30].

I.2.4.3 Les zones de glissements et d'adhérence du contact rail-roue

Les résultats de Carter ont permis à Johnson [33] d'étendre les résultats obtenus précédemment aux cas de contacts circulaires accompagnés d'un glissement longitudinal ν_x et transversal ν_y. Ces mêmes résultats sont ensuite généralisés par Haines et Ollerton [34] ainsi que Vermeulen et Johnson [35] en considérant les mouvements de spins négligeables devant les autres glissements présents au contact. Ils supposent pour cela que la zone d'adhérence est une ellipse similaire à l'empreinte du contact, dont la position est calculée à partir des glissements existants.

L'ensemble de ces théories permettent de déterminer la répartition des contraintes tangentielles q(x,y) et des zones d'adhérence et glissement dans un contact elliptique roulant, figure I.24. Ces mêmes théories ont pu être généralisées par Kalker en 1991.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

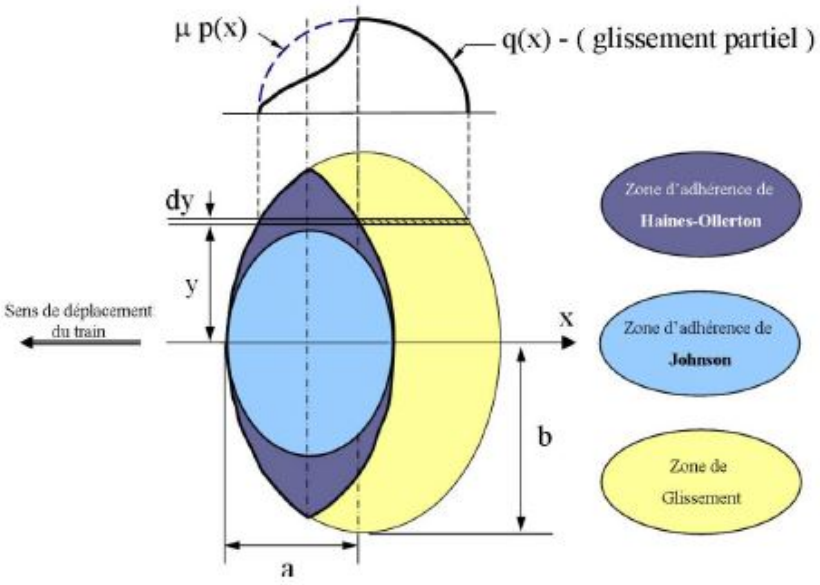


FIGURE I.24 – Les différentes théories d'un contact elliptique roulant, illustration issue de [36].

D'un point de vue expérimental, les approches réalisées par Carter, Johnson, Haines ou encore Kalker ne sont que difficilement vérifiables sur des contacts réalistes. Pour autant, Niccolini [7] a pu mettre en évidence à la suite d'essais la présence de zones d'adhérence et de glissements hétérogènes et orientées selon la direction de déplacement du mobile, figure I.25.

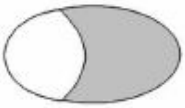
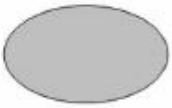
	Adhérence	Glissement partiel	Glissement complet
Théorie Haines – Ollerton 1963			
Réalité tribologique Niccolini 2001			

FIGURE I.25 – Répartition des zones d'adhérence et de glissement [7].

Plus généralement, les hypothèses faites pour la résolution des problèmes normaux et tangentiels peuvent être restrictives et ne pas s'appliquer à des problèmes industriels rencontrés quotidiennement (prise en compte de l'usure, de la présence de défauts, de la répartition non homogène du frottement au contact, ou bien encore de l'influence des rugosités au contact). En somme l'apport d'information provenant des échanges de matières dans le contact rail-roue semble nécessaire dans la compréhension de la réalité de ce contact.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.2.5 Description du contact rail-roue à l'aide d'outils conceptuels

Afin d'enrichir les modèles liés à l'étude des contacts et des interactions existantes entre deux solides, Godet [9] et Berthier [37] ont introduits différentes notions basées sur le concept de troisième corps. Parmi elles, les notions de "triplet tribologique", de "mécanismes d'accommodation de vitesse/déplacement", et enfin de "circuit tribologique" permettent de synthétiser et d'ordonner les informations obtenues lors de l'étude d'un contact.

Ces notions conceptuelles permettent en somme de décrire la vie du contact et sont à mettre en parallèle avec les théories existantes sur les contacts secs et lubrifiés.

I.2.5.1 Le triplet tribologique

Le concept de triplet tribologique permet de prendre en compte les différentes interactions existantes entre deux solides en contact dont les mouvements sont accommodés par la présence d'un troisième corps (figure I.26).

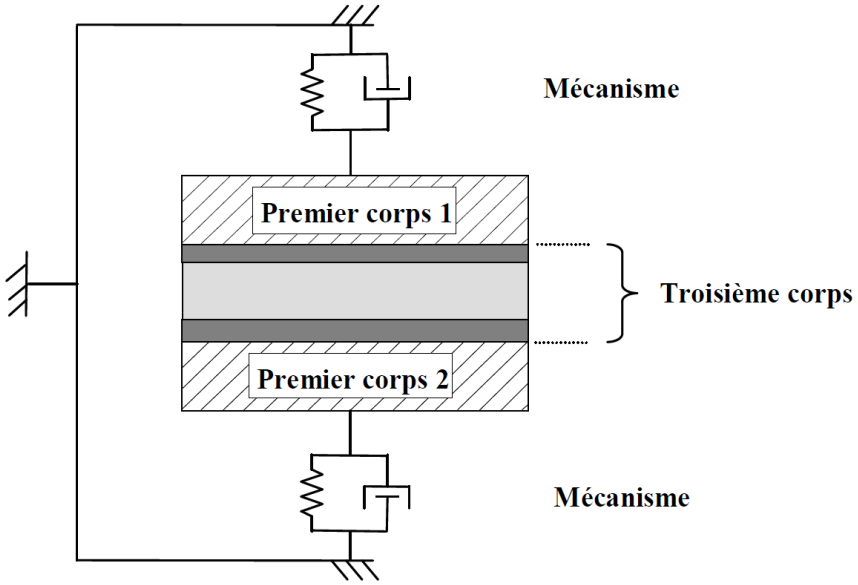


FIGURE I.26 – Triplet tribologique défini par Godet et Berthier [9].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Un triplet tribologique est donc constitué de trois éléments :

- mécanisme,
- premiers corps,
- troisième corps.

Le mécanisme régit les conditions durant lesquelles les premiers corps sont en contact. Il comprend donc l'ensemble des sollicitations et caractéristiques mécaniques (raideur, amortissement, inerties, efforts et déplacements) appliqués aux premiers corps.

Les premiers corps correspondent aux solides en contact et sont caractérisés par leurs géométries, leurs matériaux et plus généralement, leurs propriétés physico-chimiques. Ils transmettent et supportent les sollicitations induites par le mécanisme. Pour cela, ils répondent généralement par des déformations surfaciques ou volumiques. Ces dernières peuvent alors influer sur des propriétés intrinsèques aux solides en contact (géométrie, résistance mécanique ...). Ces premiers corps sont généralement étudiés en abordant des notions de mécaniques et de science des matériaux.

Les troisièmes corps jouent un rôle différent dans le contact. Ils accommodent les déplacements/vitesses des premiers corps et assurent leurs séparations. En général, ils sont formés à partir de particules détachées des deux premiers corps dont l'épaisseur est très souvent micrométrique. Dans certains cas, ils peuvent aussi être créés à partir de particules provenant d'écrans de taille nanométrique présents à l'interface entre premiers et troisièmes corps. Le troisième corps assure donc quatre fonctions principales correspondantes à :

- la transmission de la charge normale aux premiers corps,
- l'accommodation de la différence de vitesse entre les premiers corps,
- la séparation des premiers corps, afin d'éviter leur interaction directe ce qui contribue à la diminution de leur dégradation,
- la transformation de l'énergie cinétique en chaleur et la transmission d'énergie mécanique aux premiers corps.

Le troisième corps peut être défini en utilisant des notions provenant de la science des matériaux ou de cinématique des contacts. Dans le premier cas, il correspond à une zone sur laquelle une discontinuité de composition physico-chimique relativement aux premiers corps est visible. Dans le second cas, il est défini par une épaisseur au travers de laquelle est accommodée la différence de vitesse entre les deux premiers corps et les efforts normaux au contact, un exemple est visible sur la figure I.27.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

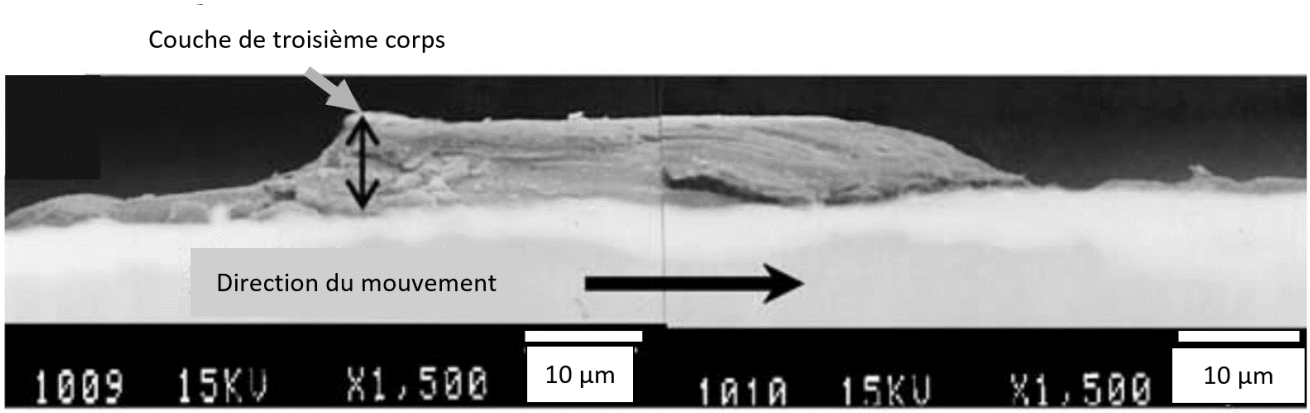


FIGURE I.27 – Couches de troisième corps observés en surface d'un rail de nuance R260. Image issue de [38].

I.2.5.2 Mécanismes d'accommodation des mouvements

La notion de triplet tribologique introduit celle d'accommodation de mouvements via l'utilisation des premiers ou troisièmes corps. Berthier [37] défini les mécanismes d'accommodation en vitesse des premiers corps en sus de celle de transmission des efforts normaux en introduisant les notions de sites d'accommodations (notés S_i) et modes d'accommodation (notés M_j, voir aussi figure I.28).

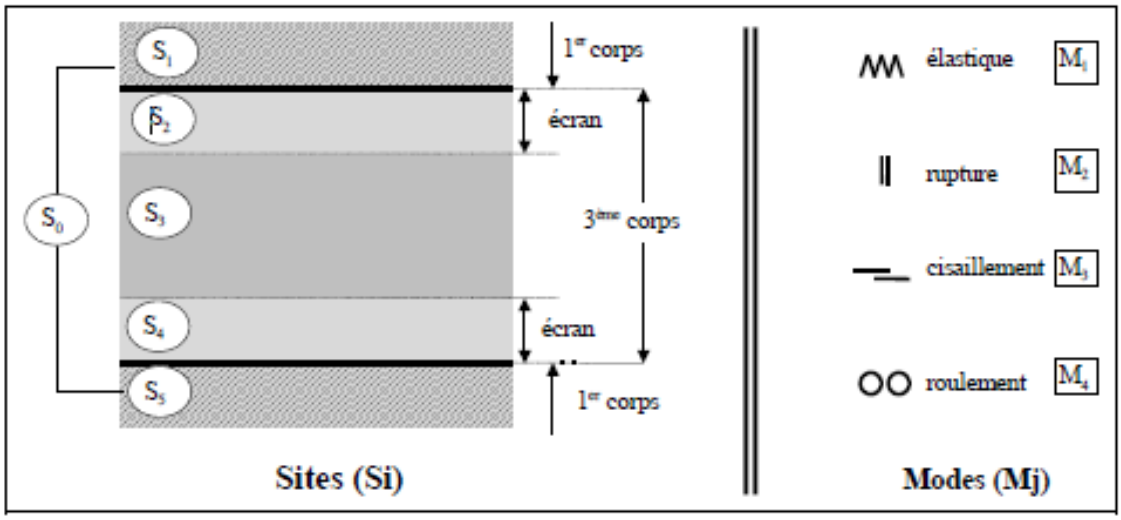


FIGURE I.28 – Mécanismes d'accommodation de vitesses définis par Godet et Berthier [9] [37].

Les sites d'accommodation correspondent aux zones sur (ou dans) lesquelles une accommodation des mouvements ou des vitesses s'effectue. Il s'agit du mécanisme (S_0), des premiers corps (S_1 et S_5), des écrans (S_2 et S_4) ou bien encore du troisième corps (S_3).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour chacun de ces sites, les mouvements des premiers corps sont accommodés selon les modes (M_j) suivants :

M_1 **:** Déformations élastiques. L'accommodation des vitesses s'effectue de façon réversible. Les solides se déforment élastiquement.

M_2 **:** Ruptures (fissuration, ...). Ce mécanisme est non réversible mais permet d'accentuer les déformations se déroulant au travers des autres modes d'accommodation. Cependant, ce mode ne correspond pas à un mécanisme d'accommodation de vitesse à proprement parler du fait de l'impossibilité de transmettre un mouvement par une rupture [39].

M_3 **:** Cisaillement. Ce mode d'accommodation est non-réversible.

M_4 **:** Formation de corps roulants dans le contact (billes, rouleaux, ...) liés au frottement dans le contact. Ce mode d'accommodation est aussi non-réversible.

Des exemples d'observation de faciès d'accommodation sont visibles sur la figure I.29

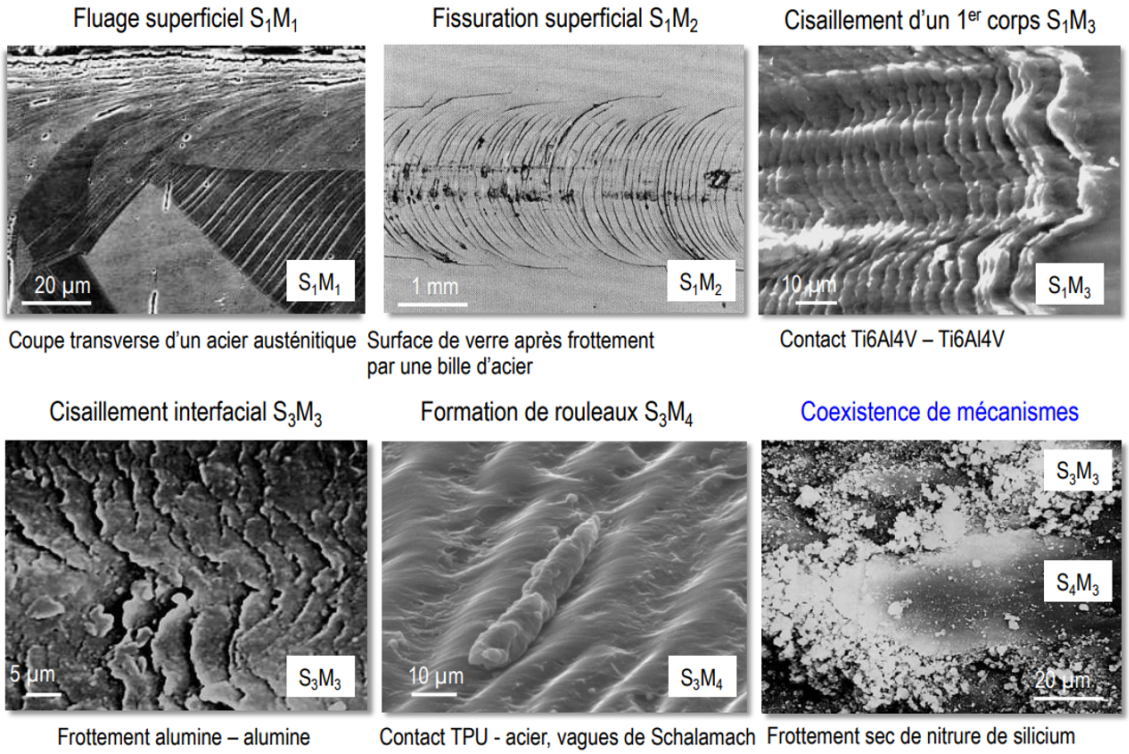


FIGURE I.29 – Exemples d'observations par microscopie électronique à balayage de faciès d'accommodation. Les images sont issues de [40].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.2.5.3 Le circuit tribologique

Les notions précédentes permettent de caractériser les conditions de contact appliquées aux premiers corps mais ne permettent pas de comprendre la totalité de la dynamique de contact. C'est ici que la notion de circuit tribologique intervient. En effet, selon Berthier [37], le circuit tribologique permet de traduire les écoulements de troisième corps sous la forme de cinq débits différents (figure I.30) :

Débit source Q_s :

Il correspond à l'apport de particules pouvant provenir des premiers corps (débit source interne noté Q_s^i ou de l'extérieur du contact (débit source externe noté Q_s^e)

Débit interne Q_i :

Il correspond au débit des particules de troisième corps présentes dans le contact.

Un débit d'éjection Q_e :

Il correspond au débit de particules de troisième corps s'échappant du contact ainsi qu'à une somme de débits de recirculation et d'usure.

Un débit de recirculation Q_r :

Il correspond à la quantité de particules retournant dans le contact après éjection.

Un débit d'usure Q_u (ou Q_w, notation anglaise) :

Il correspond au volume de particules définitivement éjectées du contact.

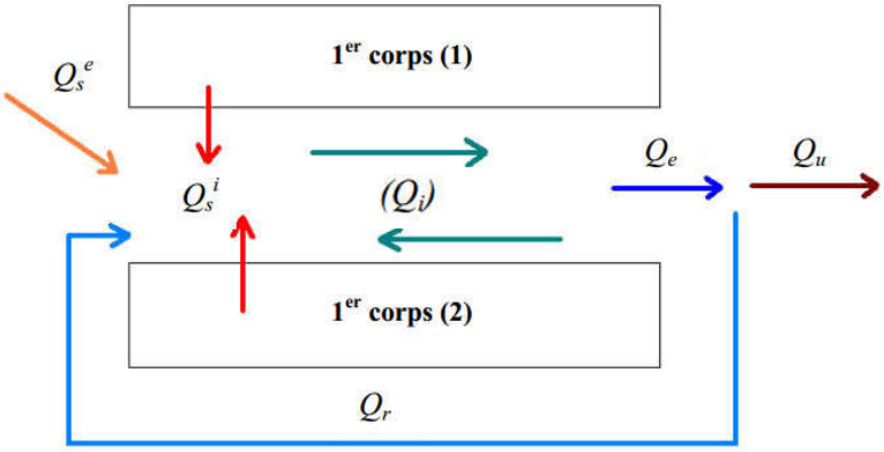


FIGURE I.30 – Circuit tribologique théorique défini par Berthier [37].

Ces notions de triplets tribologiques, sites et modes d'accommodation, et circuits tribologiques sont valables pour deux solides en contacts et leur troisième corps. Cependant, lors de l'étude de systèmes complexes à plusieurs contacts, les différents circuits tribologiques interagissent entre

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

eux. Ainsi, dans le cas d'un système complexe (comme celui associé à un contact rail-roue), il est possible de superposer deux circuits tribologiques issus de deux directions différentes (figure I.35).

Plus généralement, les débits et caractéristiques des troisièmes corps sont déterminés par les éléments de description morphologiques suivants [41] :

Faciès :

Il permet d'observer la superficie, l'élancement, la densité surfacique, la cohésion des particules de troisième corps (figure I.32). Par exemple, l'observation du faciès d'un troisième corps cisaillé peut être synonyme d'importants brassages de matière dans un contact créé par de fortes sollicitations mécaniques.

Texture :

Ce paramètre permet de décrire les transformations subies par la microstructure initiale des premiers corps. Il peut être quantifiable par des mesures de module d'élasticité, de micro et de nano-dureté.

Nature chimique :

L'étude de la nature chimique et plus généralement des variations physico-chimiques (température, humidité, oxydation) d'un élément permet d'obtenir des informations sur une éventuelle migration d'éléments provenant des premiers corps.

Une illustration des principales caractéristiques issues d'observations de troisièmes corps pour différents systèmes est visible sur les figures I.31 et I.32. Une description de l'ensemble des outils d'observation des troisièmes corps utilisés durant cette thèse est effectuée au cours du chapitre 2.

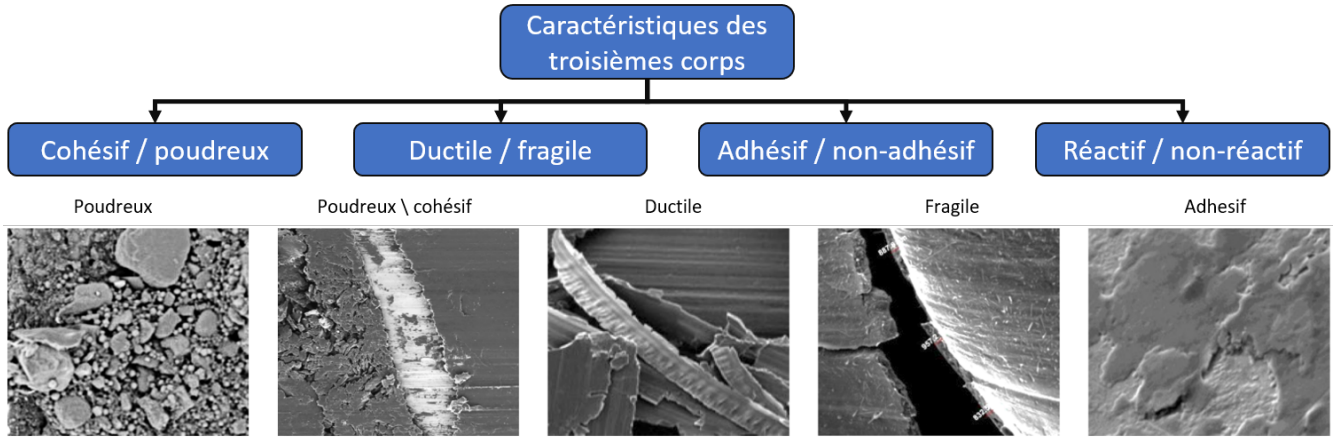


FIGURE I.31 – Illustration de différentes caractéristiques de troisièmes corps. Les images sont issues de [42, 39, 43, 36].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

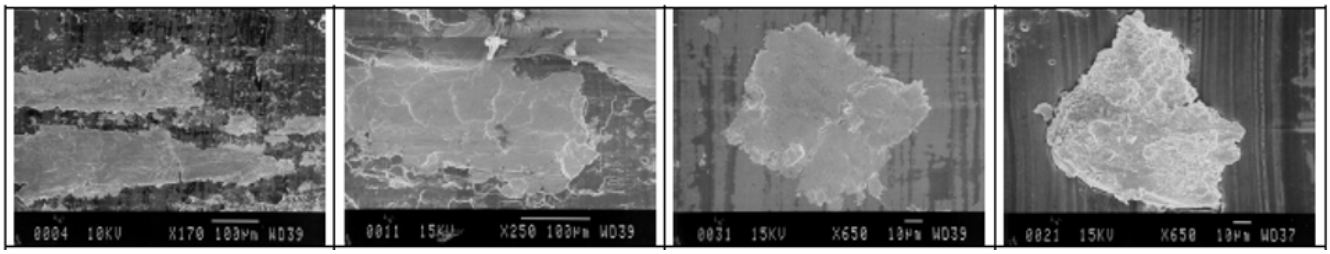


FIGURE I.32 – Aperçu de différents troisièmes corps faiblement solidaires d'un contact rail-roue [7].

La description morphologique d'un troisième corps permettant de décrire les débits activés dans un circuit tribologique fait fréquemment apparaître des fronts de fissures. Ces derniers pouvant aussi correspondre à des fronts d'écoulement de matière.

Appliqué à l'étude tribologique de l'adhérence du contact rail-roue, l'observation des troisièmes corps formés au cours de la vie d'un contact permet de compléter la caractérisation des triplets tribologiques et des débits associés. Ainsi, la réalisation d'essais tribologiques expérimentaux sera à l'origine de l'activation de débits de troisièmes corps. Leurs caractérisations peuvent s'effectuer à l'aide d'observations microscopiques mettant en évidence des faciès de troisièmes corps caractéristiques des débits activés (figure I.33).

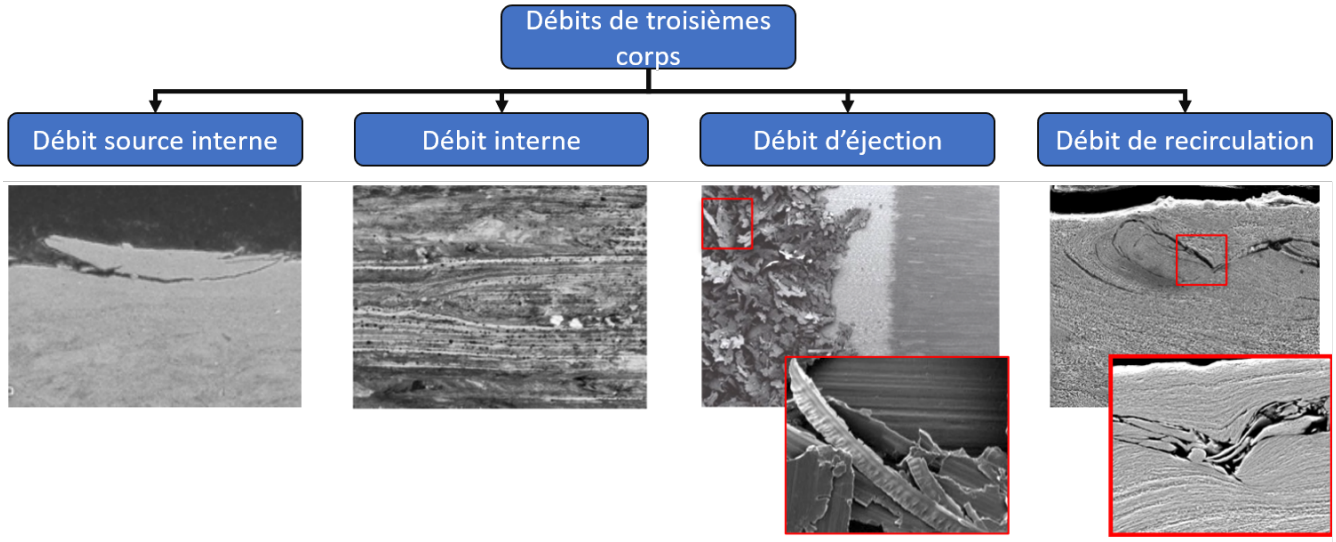


FIGURE I.33 – Observation de troisièmes corps *ex-situ* permettant de décrire l'activation de débits de matière. Les images sont issues de [39].

Les notions de circuits tribologiques et débits de troisièmes corps peuvent être appliquées dès lors que deux solides sont mis en contact et en mouvement l'un par rapport à l'autre. Cela peut ainsi être traduit à l'étude du contact rail-roue.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.2.6 Tribologie et troisième corps du contact rail-roue

Les notions évoquées précédemment peuvent être adaptées au cas d'un contact rail-roue. En effet, pour ce type de contact, les premiers corps peuvent correspondre à une roue et un rail ferroviaire, ces éléments définissant le triplet tribologique d'un contact rail-roue en présence de différents troisièmes corps (figure I.35).

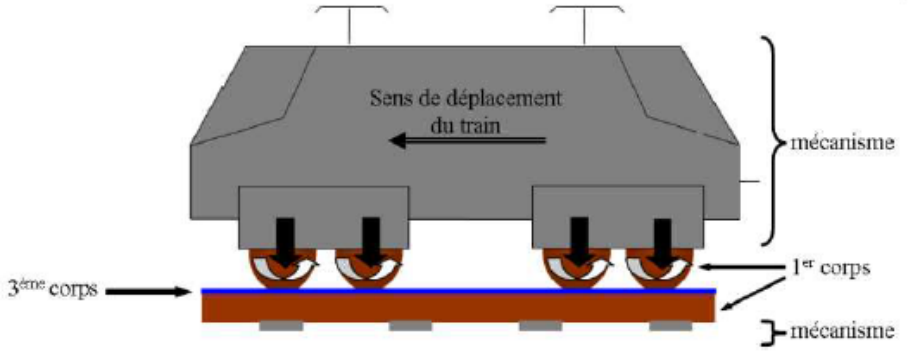


FIGURE I.34 – Application du concept de triplet tribologique au contact roue-rail [44].

Le troisième corps associé peut être composé d'acier à rail, d'acier à roue, de pollutions (végétales, organiques, lubrifiants, graisses, sable...) présentes sur la table de roulement du rail et/ou des roues.

Le circuit tribologique associé à un contact rail-roue doit considérer les débits de matière longitudinaux et latéraux du fait de la dynamique des premiers corps en contact (mentionnée en partie I.2.4).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

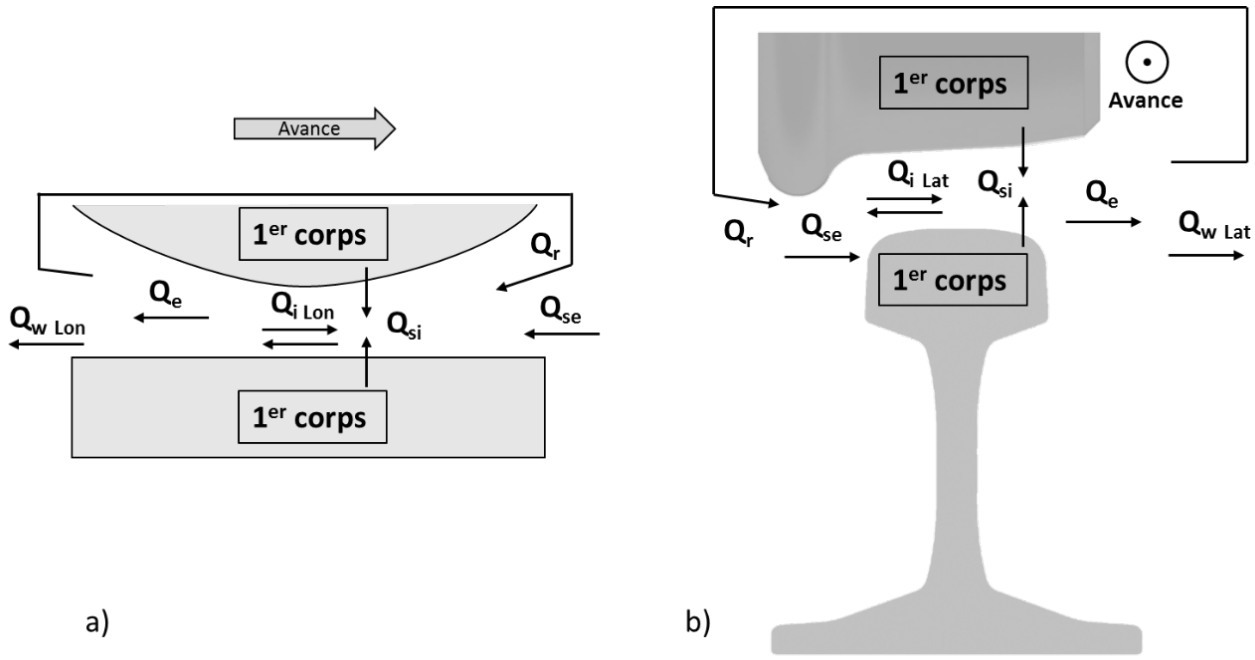


FIGURE I.35 – Circuit tribologique [37], appliqué au contact roue-rail selon les directions : a) longitudinale, b) latérale. Schéma issu de [29].

Enfin, il est aussi à noter qu'une étude liée à la caractérisation temporelle et spatiale des débits visibles sur l'image I.35, et en particulier des débits de recirculation longitudinaux $Q_{r-longi}$ et d'usure latéraux Q_{u-lat}, peut permettre selon Niccolini [7] et Merino [29] de reconstituer efficacement la dynamique locale du contact rail-roue.

Différents outils tribologiques théoriques et conceptuels permettant de comprendre l'évolution des connaissances disponibles sur le contact rail-roue ont été présentés. Cependant, comme pour tout mode de transport, une circulation ferroviaire peut connaitre des situations dégradées liées à des pertes de fonctionnalités au niveau du contact rail-roue.

En effet, du fait de l'application de pressions de contact supérieures au GPa, d'une répétition de sollicitations mécaniques au niveau des rails et des roues, le fonctionnement d'un contact rail-roue peut être perturbé par dégradation / perte d'intégrité des premiers corps (figure I.36).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

(a) (b) (c)

FIGURE I.36 – Encadrés jaunes, liste non exhaustive : a) Aperçu d'un défaut de rail type head-check. b) Aperçu d'un défaut de rail de type usure ondulatoire. c) Aperçu d'un défaut de fatigue interne d'une roue [45]. Ces trois éléments peuvent mener à un retrait des solides en contacts du fait de la présence de défauts pouvant impacter la sécurité des circulations ferroviaires.

Le contact rail-roue peut aussi être dégradé (d'un point de vue mécanique, associé à la transmission des efforts tangents au travers du contact) suite à la présence de troisièmes corps externes artificiels ou naturels sur la surface d'un rail.

L'une des particularités du transport ferroviaire repose sur le faible besoin énergétique nécessaire au déplacement d'une masse importante. Ce besoin se traduit par une faible résistance au roulement significative de l'existence d'un faible facteur de frottement défini par le rapport des efforts tangents et normaux au contact. L'ordre de grandeur de ce facteur est de 0.3 pour un rail et d'un ensemble essieu-roue non constitué d'un troisième corps externe. Dans ce cas, le contact est considéré comme « propre/non pollué/sec » vis à vis des zones d'adhérence et de glissement du contact rail-roue. Toutefois, le facteur de frottement du contact peut chuter fortement lorsque la surface du rail fait l'objet d'ajout d'un troisième corps externe d'origine naturelle et/ou artificielle. La surface des rails est cette fois-ci considérée comme « polluée » . Cette pollution est associée à un troisième corps externe au contact pouvant engendrer des incidents perturbant la sécurité de l'exploitation ferroviaire (figure I.37). Les principaux types de troisièmes corps externes modifiant l'adhérence d'un contact rail-roue sont présentés en partie I.4.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

FIGURE I.37 – Collision entre deux trains à Salisbury le 31/10/2021 due à la présence de feuilles mortes sur les rails dégradant leurs capacités de freinage [46].

La diminution du facteur de frottement peut survenir toute l'année. Elle est souvent accentuée en automne avec la chute massive de feuilles, ou bien encore avec les fortes variations de température et d'hygrométrie ; on parle alors d'adhérence dégradée des trains.

I.3 Généralités sur l'adhérence du contact rail-roue

Chaque automne, des incidents dus à un manque d'adhérence des roues aux rails impactent la sécurité et la régularité des trains. Ils peuvent par exemple être à l'origine d'un franchissement d'un point protégé (talonnage d'un aiguillage, arrêt hors quai, franchissement d'un signal d'arrêt...).

La présence conjuguée de feuilles mortes écrasées par les roues et l'humidité ambiante génère une pâte végétale sur le rail qui réduit considérablement l'adhérence selon différents retours d'expériences internes conduit par le gestionnaire d'infrastructure ferroviaire français SNCF Réseau. Ce type de perte d'adhérence survient lors des phases de freinage (phénomène d'enrayage) et d'accélération du train (phénomène de patinage). En 2020, SNCF Réseau a identifié plus de 85000 minutes perdues liées à ces problèmes d'adhérence [3].

Pour lutter contre ces pertes de temps, garantir la sécurité et la régularité des circulations, des

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

mesures curatives et préventives sont quotidiennement mises en œuvre. En période automnale, des wagons nettoyeurs de rails, figure I.38, sont déployés sur l'ensemble du réseau français. Ils nettoient et brossent périodiquement des zones identifiées propices à des pertes d'adhérence.

FIGURE I.38 – Aperçu d'un wagon nettoyeur de rail à haute pression (1000 bars).

Lorsqu'une roue roule sur un rail, un effort de traction ou de freinage peut atteindre jusqu'à 30% de la charge à l'essieu dans des conditions optimales [47]. En revanche, lorsque les conditions météorologiques (température, hygrométrie...) se dégradent, la transmission de ces efforts peut atteindre 15% de la charge à l'essieu. Dans les cas les plus critiques, il peut arriver qu'en traction ou en freinage, les essieux moteurs d'une locomotive glissent sur les rails endommageant l'infrastructure ferroviaire ou causant des problématiques de sécurité des circulations. On parle alors d'évènements d'adhérence dégradée associés à un patinage ou un enrayage.

I.3.1 Les notions de patinages et d'enrayages.

Les incidents liés à la perte d'adhérence d'un train sont catégorisés en deux types : patinage et enrayage.

Lors d'un **patinage**, la vitesse tangentielle de la roue d'un essieu qui patine est supérieure à la vitesse du véhicule. Ce phénomène entraine une difficulté liée à l'accélération et à l'atteinte de la vitesse de consigne d'un train. Un patinage est donc synonyme de retards, voire dans les cas les plus sévères, d'un arrêt des trains. Le patinage d'un essieu peut dégrader les rails, le matériel roulant, et affecter l'intégrité structurelle de l'infrastructure ferroviaire (figure I.39). Il correspond donc à un glissement de la roue sur le rail ne permettant pas une transmission nominale (relative à une situation sans perte d'adhérence) de l'effort de traction.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

FIGURE I.39 – Conséquence d'un patinage sur roue et rail, les profils en surface des deux solides sont modifiés et endommagés.

Lors d'un **enrayage** la vitesse tangentielle de la roue est nulle (la rotation de l'essieu est donc bloquée), alors que la vitesse du train ne l'est pas. Ce phénomène a comme conséquence directe d'allonger les distances de freinage, voire dans les cas les plus sévères d'endommager la table de roulement des roues (figure I.40). Un enrayage compromet la sécurité d'une circulation ferroviaire et correspond donc à un glissement de la roue sur le rail ne permettant pas une transmission nominale (relative à une situation sans perte d'adhérence) de l'effort de freinage.

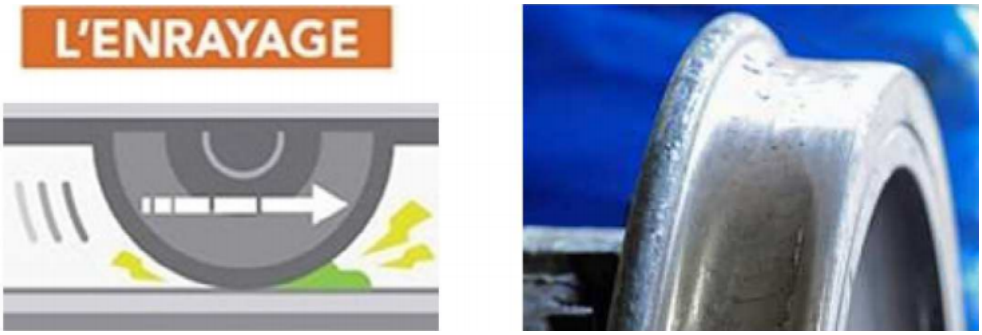


FIGURE I.40 – Conséquence d'un enrayage, un défaut de circularité des roues est généré. La roue devient plane localement.

Ces types d'incidents sont associés à la définition d'un facteur de frottement traduisant l'adhérence ferroviaire d'un train. Il est mesurable macroscopiquement à l'échelle d'un contact rail-roue et relié aux variations de glissement subies par ce contact.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.3.2 Les notions d'adhérence et de glissement du contact rail-roue

Les notions "d'adhérence" et "d'adhésion" sont à différencier. L'adhésion correspond à l'ensemble des phénomènes physico-chimiques entrant en jeu lors du contact entre deux matériaux pour créer une résistance à la séparation [48].
L'adhérence désigne quant à elle l'ensemble des forces s'exerçant entre deux substances en contact étroit et les empêchant de glisser l'une contre l'autre [49].

Appliquée à l'étude du contact rail-roue, d'un point de vue tribologique, l'adhérence correspond donc aux variations d'efforts tangentiels du contact et est associée à la mesure d'un **facteur de frottement** noté "μ". Ainsi, l'adhérence d'un solide en mouvement relatif à un autre correspond au rapport entre les efforts tangentiels et normaux au contact [31] (équation I.7)

$$\mu = \frac{F}{N} \tag{I.7}$$

avec :

- N : Effort normal appliqué à un essieu.
- F : Effort de traction ou de freinage d'un essieu.

La mise en évidence des zones de glissement et d'adhérence issues des principales théories du contact roulant présentés en partie I.2.4 sert à définir une courbe théorique reliant le taux de glissement appliqué au contact rail-roue (équation I.6) à l'évolution de son adhérence [50]. Ces éléments sont visibles sur la figure I.41.

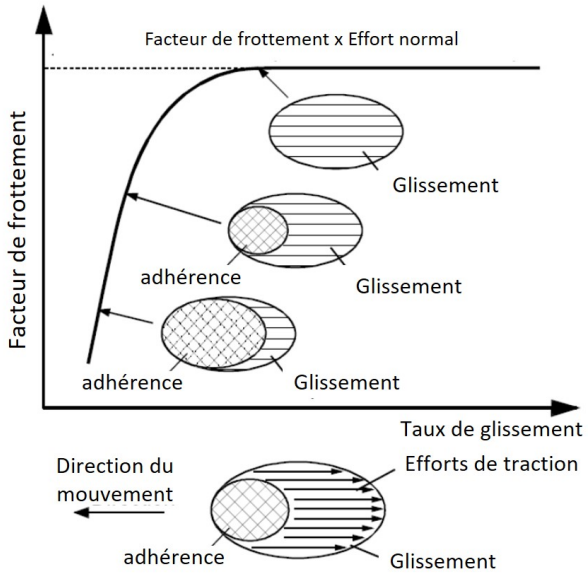


FIGURE I.41 – Evolution théorique de l'adhérence d'un contact rail-roue en fonction du taux de glissement [50].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Remarque : Un contact rail-roue peut être reproduit sur un banc d'essais à partir de conditions de roulement avec ou sans glissement. Par conséquent, l'utilisation du terme "coefficient de frottement" n'est pas adaptée. Ce terme se réfère principalement à des conditions de glissement pur, ou à un mouvement relatif naissant (coefficient de frottement statique).

Les résultats visibles sur la figure I.41 sont valables lorsque les taux de glissements appliqués au contact ne font pas l'objet d'une régulation (au travers de boucles d'asservissements). Une régulation du glissement génère l'obtention de variations spécifiques des facteurs de frottement explicités par Boiteux [51]. Ces derniers sont issus de données expérimentales et sont synthétisés sur la figure I.42.

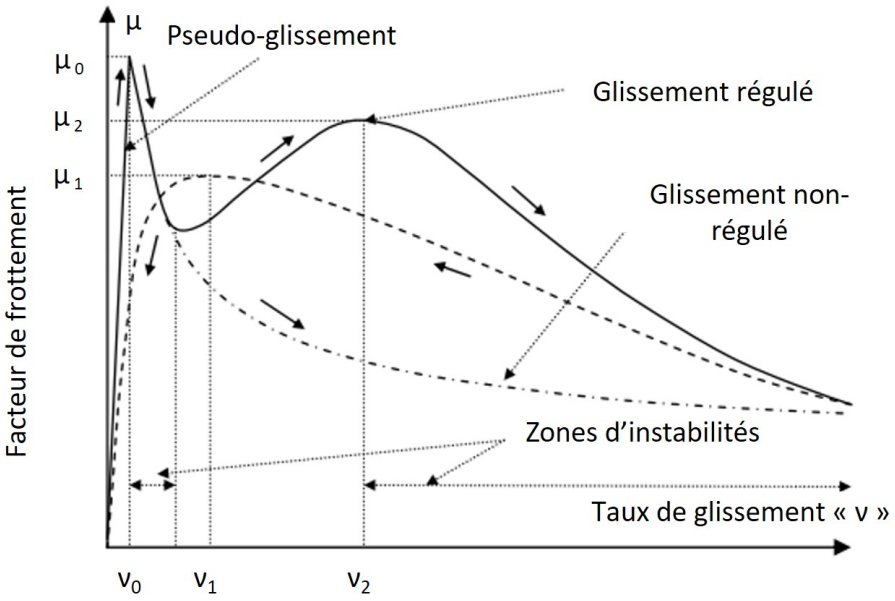


FIGURE I.42 – Valeur absolue de l'adhérence ferroviaire en fonction de la valeur absolue du glissement relatif, schéma issu de [5].

La mesure des facteurs de frottement effectuée avec et sans régulation du taux de glissement appliqué au contact permet de définir deux phases de fonctionnement distinctes :

Pseudo-glissement : Au cours de la mise en mouvement ou du démarrage d'un train, le facteur de frottement augmente de façon linéaire et sert à définir le couple $(\nu_0; \mu_0)$ correspondant à la valeur maximale du facteur de frottement obtenu pour un taux de glissement donné.

Glissement complet : L'augmentation du taux de glissement au-delà de la valeur ν_0 est associée à une diminution des efforts liés au mouvement d'un train par rapport à ceux correspondant à un facteur de frottement maximal. Le glissement des roues est alors accentué, l'adhérence (mesurée au travers des variations du facteur de frottement) diminue avec l'augmentation du taux de glissement. Des phénomènes de patinage et d'enrayage peuvent alors être rencontrés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

La régulation du taux de glissement est à l'origine de zones d'instabilités pour lesquelles de faibles variations de taux de glissement génèrent une baisse importante des facteurs de frottement. Ces zones sont comprises d'une part pour des valeurs ν de taux de glissements variants sur un intervalle $[\nu_0; \nu_1]$ et d'autre part pour des valeurs ν de taux de glissements supérieures à une valeur ν_2. Cette dernière correspondant à un facteur de frottement maximal (noté μ_2) pouvant être obtenu au cours d'une phase de glissement complet. Elle est communément appelée "Pointe de Kalker" [52]. La valeur du facteur de frottement μ_1 correspond à la valeur minimale obtenue en phase de glissement complet.

La régulation du glissement permet ainsi de définir une zone d'équilibre stable vis-à-vis de l'adhérence correspondant aux points $(\nu_1; \mu_1)$ ainsi qu'une zone d'équilibre instable correspondant aux points $(\nu_2; \mu_2)$. La régulation du taux de glissement a ainsi comme objectif de maintenir un taux de glissement associé à un équilibre stable du facteur de frottement pour un fonctionnement en glissement complet. L'utilisation de dispositifs à régulation de glissement (communément appelés dispositifs d'anti-enrayage en phase de freinage et anti-patinage en phase de traction) nécessitent alors un temps de réaction faible souvent inférieur à 5ms [5])

En somme, la compréhension des différentes problématiques liées au contrôle et à l'efficacité de l'adhérence du contact roue/rail est complexe. De nombreuses études, mentionnées en partie I.4 ont été menées ces dernières années afin de décrire les différents mécanismes tribologiques appliqués à l'étude de l'adhérence d'un contact rail-roue.

À titre d'exemple Niccolini [7] a pu donner des éléments de compréhension sur les mécanismes tribologiques et physico-chimiques de perte d'adhérence pour un contact composé de différents types de troisièmes corps externes.
Lewis et Olofsson [53] ont pu étudier l'influence de la température sur les variations d'adhérence d'un contact rail-roue composé d'un troisième corps externe organique.
Plus récemment, Bringel [54] et Ishizaka [55] ont mis en évidence l'influence de transformations physico-chimiques liées à des troisièmes corps externes organiques sur les variations d'adhérence d'un contact rail-roue.
Les variations d'adhérence de ce contact sont ainsi à expliciter d'un point de vue pluridisciplinaire au travers de notions théoriques, expérimentales, mécaniques, et physico-chimiques.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.4 Etudes bibliographiques de l'adhérence d'un contact rail-roue

I.4.1 L'utilisation de retours d'expériences techniques et scientifiques

Différents éléments peuvent être à l'origine d'un incident de patinage ou d'enrayage. Ils s'étendent de l'application des gestes métiers des conducteurs de trains (liés à l'augmentation de l'anticipation des zones de freinage) à la présence de troisièmes corps externes (polluants) modifiant l'adhérence et présents sur la surface des rails. Ces pollutions viennent s'ajouter aux troisièmes corps présents naturellement dans un contact rail-roue. Elles peuvent être composées de :

- rosée matinale, givre, neige, grêle, coulées de boue,
- végétaux présents sur les voies,
- résidus de graisses liés aux opérations de graissage de rail (figure I.43), provenant du matériel roulant, ou de l'infrastructure ferroviaire (appareils de voies, appareils de dilatation,...),
- pollution d'origine externe (industrie générant des polluants sous forme de poussière ; stockage et séchage de produits oléagineux).

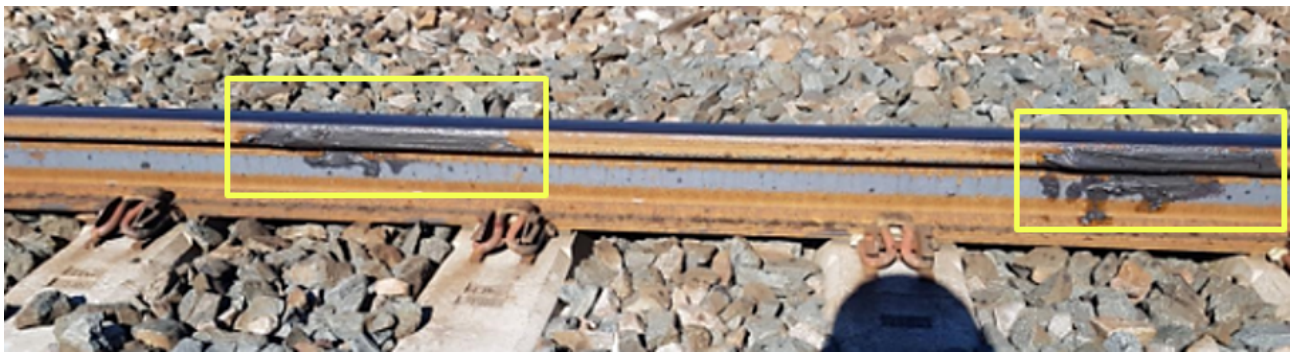


FIGURE I.43 – Rail graissé excessivement ayant engendré un enrayage avec arrêt d'un train hors quai (document interne SNCF). Les zones encadrées permettent d'identifier des zones graissées excessivement.

Ces pollutions ne restent pas forcément cantonnées sur leur zone d'origine et peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres, lorsqu'elles sont entraînées par les circulations ferroviaires [41]. Elles peuvent également être accentuées à la suite d'épisodes ou de conditions atmosphériques particuliers (début de pluie après une période de sécheresse, pluies intermittentes, tempête automnale, etc.), et survenir majoritairement en automne (figure I.44) lors de l'augmentation des valeurs d'hygrométrie relatives de l'air (fin de nuit, début de matinée, figure I.45). Ces différentes conditions ont pu être recensées par l'organisme britannique RSSB "Rail Safety and Standards Board" (figure I.46).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

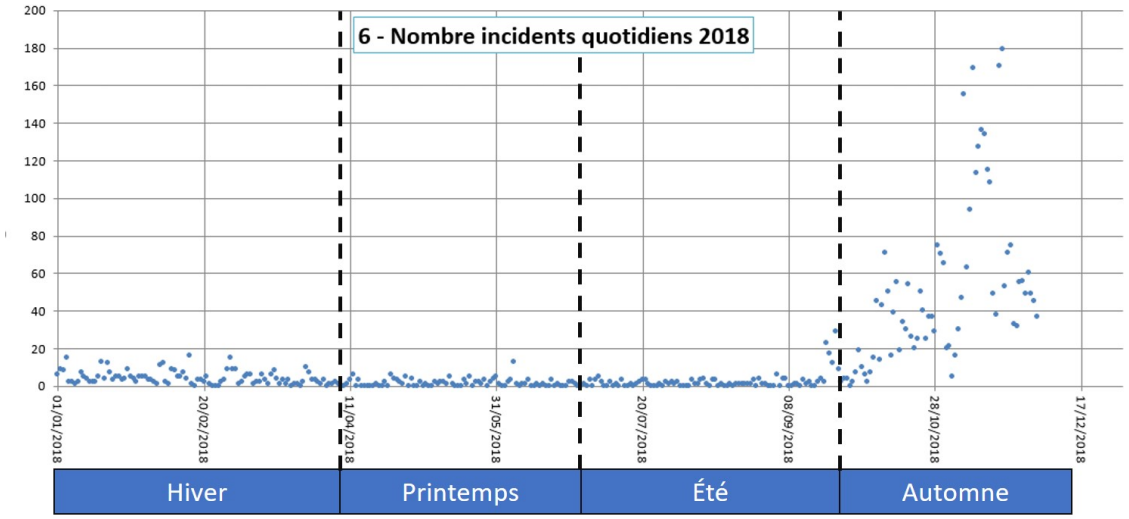


FIGURE I.44 – Nombre d'incidents quotidiens liés à une adhérence dégradée en 2018 sur le réseau SNCF.

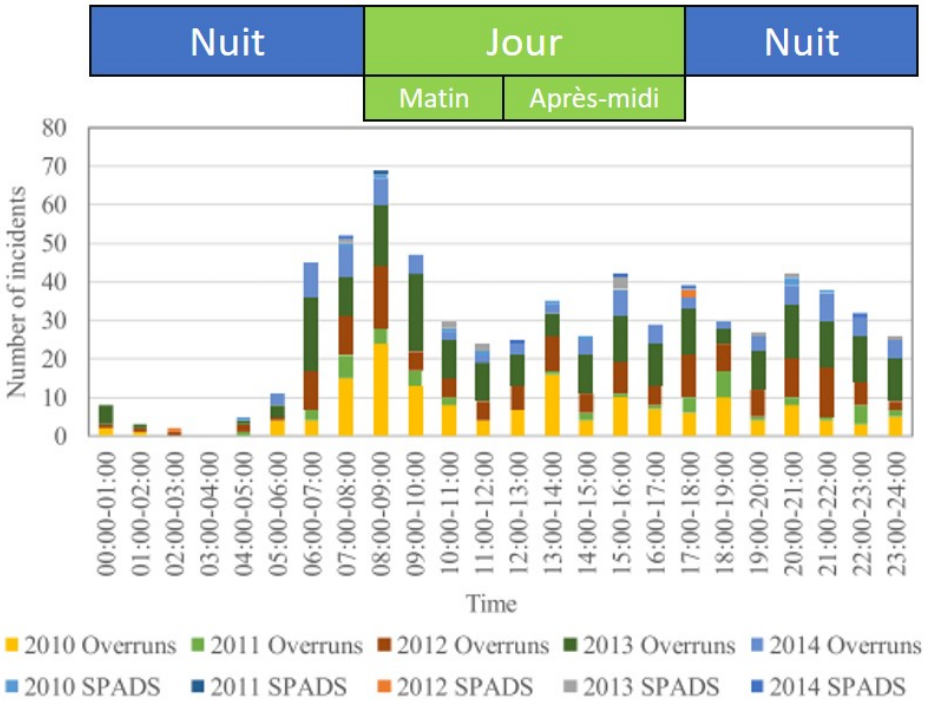


FIGURE I.45 – Moyenne quotidienne du nombre d'incidents liés à l'adhérence répartis sur une journée sur le réseau Network Rail. SPAD signifie "Signal Passed At Danger", équivalent à un franchissement de signal fermé. "Overruns" correspond à un arrêt hors-quai. Figure issue de [56].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Niveau d'adhérence	Facteur de frottement μ	Description	
Elevé	> 0,15	Rails secs ou humides sans pollution externe	
Intermédiaire	0,1 - 0,15	Rails humides avec une faible pollution externe	
Bas	0,05 - 0,09	Matins d'automne typiques en présence de rosée et d'humidité, souvent combinés à une légère oxydation nocturne de la surface des rails.	
Très bas	< 0,05	Pollution externe importante souvent due à la présence de feuilles mortes en surface des rails et parfois à d'autres pollutions.	

FIGURE I.46 – Exemple de classification de niveaux d'adhérence [57].

La nature et les conditions d'utilisation des installations ferroviaires sont également à prendre en compte pour juger de l'influence de ces troisièmes corps externes sur l'adhérence du contact. Les facteurs aggravants peuvent être :

- un écrasement important de la surface du champignon des rails diminuant leurs rayons de courbure, la présence d'une usure ondulatoire prononcée étant à l'origine de régimes d'instabilités des zones d'adhérence et de glissement présentes au contact [44],
- une interruption significative de trafic engendrant une accumulation de pollution sur la surface des rails,
- une déclivité (rampe/pente) des voies importante (> 10 mm/m).
- une zone de freinage fréquente.

Les facteurs présentés dans cette section peuvent donc être classés en deux thèmes. Le premier porte sur l'influence de la présence de troisièmes corps externes réduisant l'adhérence. Le second porte sur l'influence de la nature et des conditions d'utilisation des installations ferroviaires et des matériels roulants sur l'adhérence du contact rail-roue. Les principaux résultats issus d'études tribologiques réalisées sur ces thèmes sont présentés sur la partie suivante.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.4.2 Facteurs influant sur l'adhérence d'un contact rail-roue

Plusieurs facteurs contribuant aux variations d'adhérence du contact rail-roue ont pu être identifiés au travers d'études scientifiques basées sur des retours industriels. Ces derniers portent sur les éléments suivants et sont synthétisés ci-après :

- la vitesse de circulation des trains,
- la présence d'eau (neige, givre, humidité) au contact,
- la présence d'oxydes de fer au contact,
- l'ajout de sable au contact,
- l'influence de la température des premiers corps,
- la présence de troisièmes corps externes organiques au contact. Ce point fera l'objet d'une description détaillée en partie I.4.3.

La vitesse d'avance d'une locomotive est à prendre en compte sur l'adhérence disponible au contact. Cette dernière décroit pour des vitesses supérieures à 120 km/h et peut servir de facteur servant à définir une vitesse de circulation maximale d'un train [58][59]. Les liens entre vitesse maximale d'une circulation ferroviaire et l'adhérence du contact dépendent des types de troisièmes corps formés au contact.

La présence de troisièmes corps externes d'origines naturelles et artificielles a fait l'objet d'étude visant à caractériser leurs influences sur l'évolution de l'adhérence d'un contact rail-roue.

I.4.2.1 Influence des principaux troisièmes corps externes d'origines naturelles et artificielles sur l'évolution de l'adhérence du contact rail-roue

I.4.2.1.a Influence de la présence d'eau sous différentes formes sur l'adhérence

Les troisièmes corps externes d'origines naturelles modifiant l'adhérence repris en partie I.4.1 font l'objet dans cette section d'un apport d'informations issues de publications scientifiques.

La présence d'eau au contact provenant de pluies faibles de type "crachin" ou de pluies d'intensités plus fortes ont tendance à diminuer l'adhérence disponible au contact. Selon Meierhofer [60] et Jan [61], un crachin dégrade l'adhérence disponible au contact pour un train quand des pluies fortes vont au contraire avoir tendance à augmenter l'adhérence disponible. Ces comparaisons sont relatives à la présence d'une pluie de faible intensité. Les variations d'humidité d'un environnement vont aussi influer sur l'adhérence du contact.
En effet, selon Boiteux [51], Ishizaka [56] et Rong [62], l'augmentation de l'humidité d'un environnement contribue à la baisse de l'adhérence disponible au contact et peut être associée à une

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

augmentation du nombre de patinages et d'enrayages.

De façon similaire, Nagase [63], a pu montrer à l'aide de mesures réalisées à la suite de l'utilisation d'une locomotive, que la présence de neige et de givre modifie significativement l'adhérence disponible au contact. Ces éléments se comportant de façon similaire à la présence d'eau en surface des rails (fonte de la neige se transformant en eau liquide).

Les résultats d'Oyama [64] (figure I.47) synthétisent les éléments mentionnés précédemment. L'influence de la vitesse de circulation d'un train couplée aux types de troisièmes corps externes d'origine naturelle est donc à prendre en compte. L'adhérence est aussi modifiée par l'ajout de troisièmes corps externes d'origines artificielles.

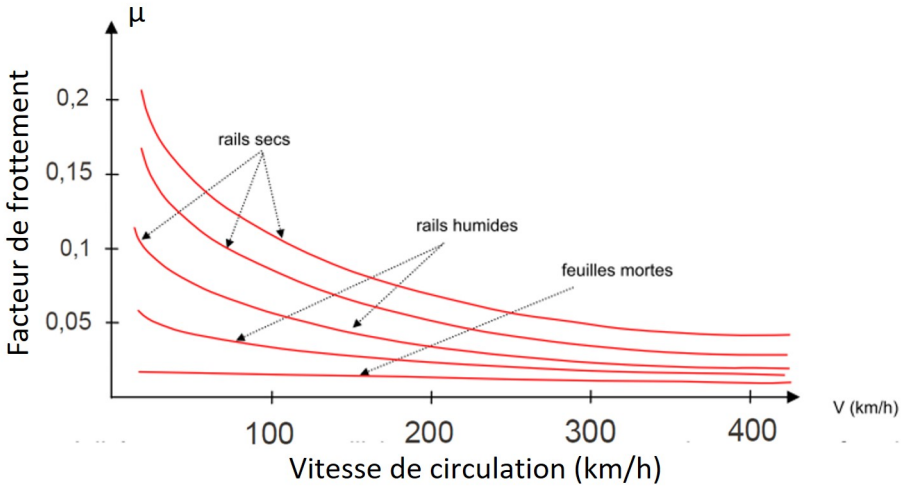


FIGURE I.47 – Influence de la vitesse sur l'adhérence disponible [64].

I.4.2.1.b Influence de l'utilisation de produits modificateur de frottement sur l'adhérence

Des conditions d'adhérence dégradée peuvent être associées à la présence de troisièmes corps externes formés du fait de l'ajout d'eau sur la surface d'un rail. Ce faisant, des couches sèches d'oxydes de fer (wustite, hématite, magnétite) peuvent modifier l'adhérence disponible au contact. La présence de ces types de matériaux en surface de rail a pu être déterminée comme impactant positivement l'adhérence disponible du contact selon Beagley [65]. L'usage d'oxydes de fers est aussi associé à l'utilisation de produits modificateurs d'adhérence.

White [66] parvient ainsi à prouver que l'usage d'un mélange solide d'hématite et de sulfates d'aluminium permet d'augmenter temporairement l'adhérence disponible dans un contact rail-roue. Ces résultats sont obtenus à la suite d'essais effectués sur un banc de type bi-disque.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

De façon plus globale, différents travaux portant sur l'étude de produits modificateurs d'adhérence ont été effectués par les organismes British Rail et Network Rail. Ces derniers se retrouvent (à l'exception de certaines références) sans réels effets notables et durables sur l'adhérence [57]. Dans certains cas, la présence de particules d'alumine (éléments communément retrouvés dans ce type de produits) peut améliorer l'adhérence disponible. Elle peut toutefois générer une usure abrasive du rail et être à l'origine d'amorçage de défauts de fatigue. L'augmentation de l'adhérence disponible pour un contact rail-roue est aussi effectuée à l'aide de l'utilisation de particules de sable.

I.4.2.1.c Influence de l'application de sable sur l'adhérence

Des études portant sur l'influence de l'application de sable au contact en lien avec le recouvrement de l'adhérence ont été menées par Omasta [67]. Ses travaux mettent en évidence l'impact bénéfique de l'ajout de sable par un train sur un rail pollué par des feuilles mortes.
En parallèle, Arias-Cuevas [68] explicite l'impact de la taille des grains de sable sur le recouvrement de l'adhérence ; l'adhérence mais aussi l'usure de la surface des rails augmentent avec des grains de sable de diamètre important. L'introduction de sable au contact est considérée comme l'un des moyens les plus efficaces pour diminuer l'influence d'une perte d'adhérence [68]. Néanmoins, le sablage des rails par les locomotives peut aussi endommager les surfaces de contact [67][69] ou perturber la localisation des trains [70][54].
Wang [71] en se basant sur des travaux réalisés par Lewis [72], donne des résultats sur l'influence combinée de sable et d'eau obtenus au travers d'essais effectués sur un banc de type bi-disque. Tout en conservant des pressions de contact similaires à celles d'un contact rail-roue à l'échelle 1, cet auteur montre que la présence combinée d'eau et de sable permet de retrouver des niveaux d'adhérence proches de ceux d'un contact sec.
L'ajout de sable au contact modifie aussi les rugosités présentes sur la surface des rails et des roues. Pour des voies ayant une déclivité non nulle, l'ajout de sable par un train sur ses rails génère une usure par abrasion de leurs surfaces. Cette dernière est à l'origine de la présence de cavités de l'ordre de 0.1mm de profondeur pouvant servir de réservoir à troisième corps (figure I.48). Il est alors possible qu'un troisième corps externe comble ces défauts crées par les grains de sable sur le rail (figure I.48).

Le sable agit donc comme un troisième corps bénéfique à l'adhérence à un instant donné mais aussi comme un troisième corps étant à l'origine d'usure de la surface des rails [73][70].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

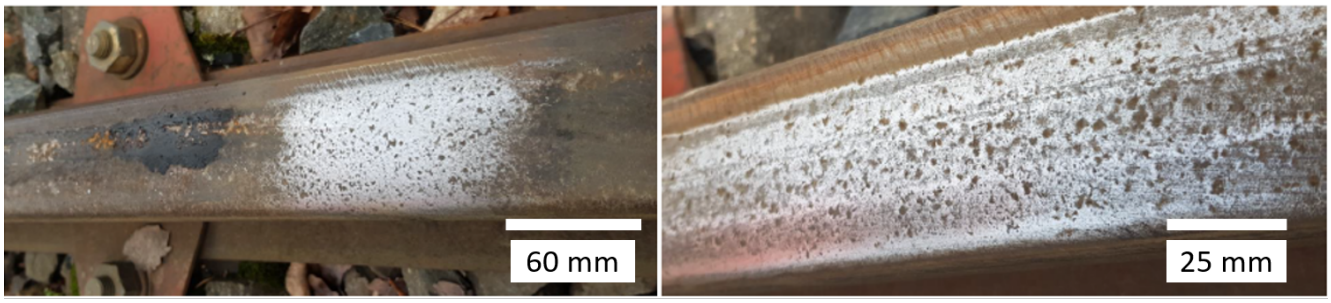


FIGURE I.48 – Mise en évidence d'usure de la table de roulement du rail généré par un sablage excessif après nettoyage d'une couche de troisième corps initialement présente.

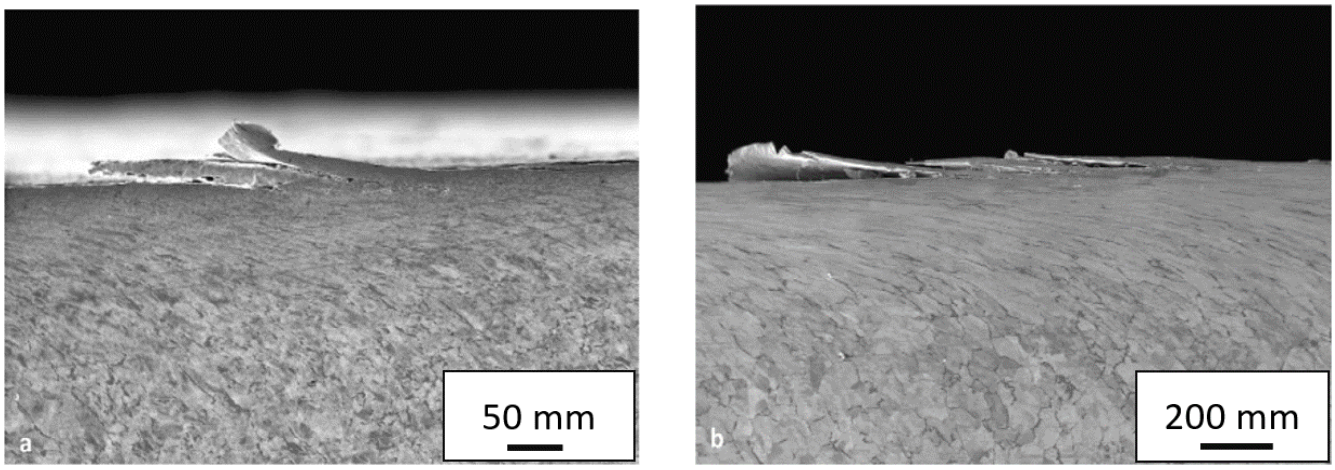
I.4.2.1.d Influence de la température sur l'adhérence

Plus récemment, l'influence de la température sur l'adhérence du contact rail-roue a pu être étudiée au travers de différents travaux. Ainsi, selon Shi [74], l'adhérence du contact rail-roue serait plus importante à basse température (à partir de -20°C) qu'à une température ambiante en raison de la diminution de l'oxydation naturelle des rails.
L'augmentation artificielle de la température sur l'adhérence d'un contact rail-roue a pu être étudiée par Ishizaka [8] au travers d'essais réalisés sur un tribomètre de type bi-disque.
Cet auteur a pu mettre en évidence le fait que l'augmentation de la température de la surface des premiers corps tend à diminuer l'adhérence d'un contact sec, et à augmenter l'adhérence d'un contact dans lequel de l'eau sous forme liquide est présente. La principale justification associée à ces phénomènes est liée à la diminution de la viscosité et de l'épaisseur de film d'eau formé à haute température.

Enfin, l'influence des déformations plastiques survenant dans un contact rail-roue a été prise en compte dans l'étude des variations d'adhérence par Krause [75]. Au travers de la réalisation d'essais sur un tribomètre de type-bi-disque, cet auteur a pu mettre en évidence la présence d'orientations cristallines dépendant des contraintes de cisaillement appliquées au contact. Plus généralement, ces contraintes génèrent des déformations plastiques déformant les microstructures des premiers corps [76] (figure I.49).

De ce fait, l'étude de l'influence des écoulements de matières survenant dans un contact rail-roue sur l'adhérence de ce couple est à détailler. Pour cela, l'utilisation d'outils de description et de caractérisation des troisièmes corps présentés en partie I.2.6 sont repris. Ils servent ainsi à décrire les mécanismes tribologiques associés à l'adhérence d'un contact rail-roue.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) (b)

FIGURE I.49 – Exemple de déformations plastiques a) Pour une roue en acier de nuance ER7 c) Pour un rail en acier de nuance R260. Ces deux images sont issues des travaux de Donzella [76].

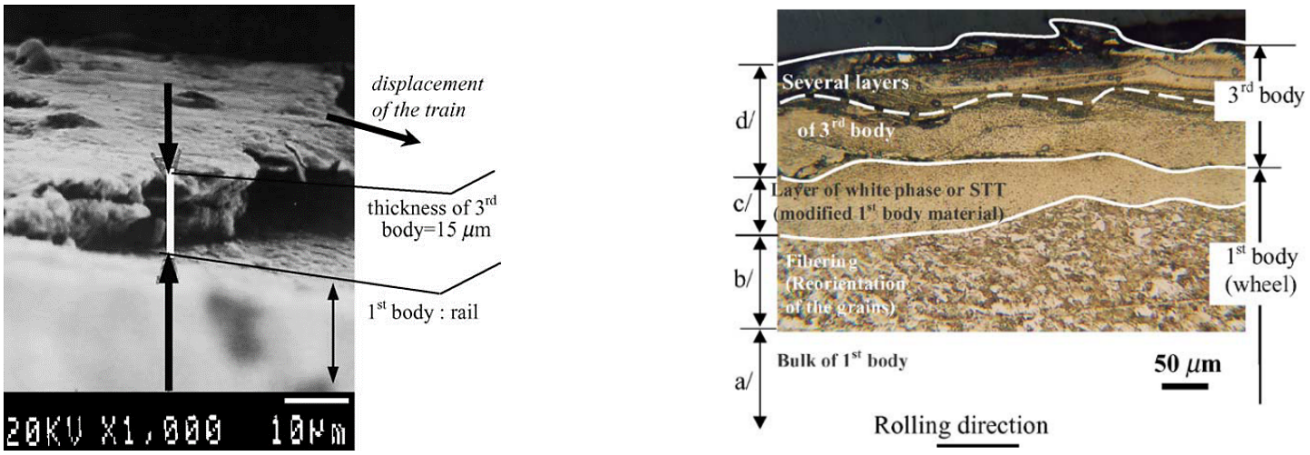
I.4.2.2 Les mécanismes tribologiques associés à l'adhérence du contact rail-roue en présence d'un troisième corps externe.

Niccolini [7] et Berthier [41] ont étudié les mécanismes tribologiques liés à l'adhérence d'un contact rail-roue avec et sans la présence de troisième corps externes. Leurs études ont permis de mettre en place une analyse des circuits tribologiques associés à une variation de l'adhérence en phase de traction. Cette démarche est basée sur des travaux expérimentaux d'observation du troisième corps issu d'un contact rail-roue.

La suite de ce document présente les principaux résultats de ce travail d'observation et de qualification des circuits tribologiques en lien avec une variation d'adhérence.

La figure I.50 illustre la présence d'un troisième corps obtenu après observation d'une section de rail (figure I.50a) et d'une section de roue (figure I.50b).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) (b)

FIGURE I.50 – a) Vue en perspective d'une section de rail b) Vue en coupe d'une roue avec une troisième couche de corps. Ces deux images sont issues de [38].

Il est possible d'identifier sur cette dernière figure la présence d'une couche de troisième corps correspondant théoriquement à un mélange des matériaux issus des deux premiers corps, rail et roue, et des troisièmes corps externes rencontrés par le contact.

Cette couche de troisième corps est aussi précédée d'une couche de phase blanche mesurant environ 50µm d'épaisseur. Ces deux dernières sont séparées par une interface composée des matériaux issus des premiers et troisièmes corps. Les clichés sont pris après application d'un fort glissement lié au démarrage d'un train.

Toujours dans le cas d'un contact rail-roue, du fait de l'apparition instantanée d'une pression de contact et de gradients de cisaillement et de déformation, le troisième corps peut s'écouler dans le contact. Le matériau formé permet ainsi de réaliser l'accommodation des vitesses et déplacements dans les zones de glissements mise en évidence expérimentalement par Nicolini [7].

La rhéologie de cette couche dépend des conditions de contact, certains types de troisième corps peuvent être très adhérents aux roues et aux rails quand d'autres peuvent être éjectés du contact ou se stratifier puis se décoller sous la forme d'écailles (voir aussi partie I.2.5.1).

La réalisation d'analyse de troisièmes corps ne peut être qu'*ex-situ* du fait des évolutions rapides des états de surfaces pouvant être rencontrés. Par exemple, une pluie forte peut nettoyer la surface des rails et éjecter les troisièmes corps à analyser après une perte d'adhérence. Une autre option d'analyse peut alors consister à utiliser un traceur (poudre d'alumine, etc...) introduit dans le contact afin, d'observer les écoulements de matières.

L'observation de ces couches de troisièmes corps peut révéler un phénomène d'adsorption de polluants présents sur la bande de roulement d'un rail pouvant augmenter l'adhérence disponible

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

(sable) ou au contraire la réduire (végétation).

Cette adsorption est régie par les contraintes normales et tangentielles de contact et influe par conséquent sur le facteur de frottement et les conditions de glissement et d'adhérence du contact. Associé à ce phénomène, la création de conditions de faible adhérence dépend de la manière dont la couche de troisième corps a été comprimée et cisaillée après passage du dernier train. À titre d'exemple, les éléments mentionnés sur la figure I.51 peuvent permettre de déterminer en fonction de la typologie de troisièmes corps observés les moyens et outils d'instrumentation [1] associés à l'étude de l'adhérence d'un contact rail-roue.

Moyens	Familles de 3ème corps	Observations de surface	Observations en coupe
Bande adhésive d'aluminium Et Réplique polymère	Faiblement solidaire	Composition chimique, cohésion, élancement, superficie, épaisseur, densité surfacique	X
Coupe métallographique des prélèvements de 3ème corps	Faiblement solidaire	X	Epaisseur, microstructures
Coupe métallographique de roue	Fortement solidaire	X	Epaisseurs, microstructures, Module d'élasticité, micro- et nano-dureté
Caméra endoscopique	Fortement solidaire et faiblement solidaire	Débits de 3ème corps	X
Moulage en résine	Fortement solidaire et faiblement solidaire	Composition chimique, cohésion, élancement, superficie, densité surfacique	X

X : pas de résultat obtenu

FIGURE I.51 – Moyens d'instrumentation du troisième corps donnés par Niccolini [7] lors de la réalisation d'étude portant sur l'évolution de l'adhérence du contact rail-roue.

Un choix approprié de moyen d'instrumentation et d'outils d'observations des troisièmes corps peut alors permettre de reconstituer la vie du contact. Pour cela, il sera nécessaire d'utiliser les outils conceptuels définis jusqu'à présent pour remonter aux débits, caractéristiques de faciès, texture, et nature physico-chimique des troisièmes corps formés dans un contact rail-roue.

Ces notions ont permis à Nicollini et Berthier [7] de montrer que l'écoulement d'un troisième corps faiblement solidaire est synonyme de l'application d'un couple moteur permettant à un train de démarrer. Ils explicitent aussi au travers d'essais en laboratoire trois étapes (figures I.52 et I.53) permettant de décrire l'évolution de l'adhérence d'un contact rail-roue en phase de démarrage :

1) La première étape consiste en une activation des débits internes liés aux écrans superficiels. Leurs rhéologies dépendent de la procédure de préparation des premiers corps avant mise

1. L'utilisation d'outils de caractérisation d'un troisième corps peut s'effectuer selon différentes méthodes principalement décrites au cours du chapitre II.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

en contact sur banc.

2) La seconde étape consiste en une activation des débits internes de troisièmes corps composés de particules de rail, de roue, et des écrans superficiels.

3) La dernière étape consiste en un détachement d'un troisième corps fortement solidaire activant des débits sources internes de particules volumineuses.

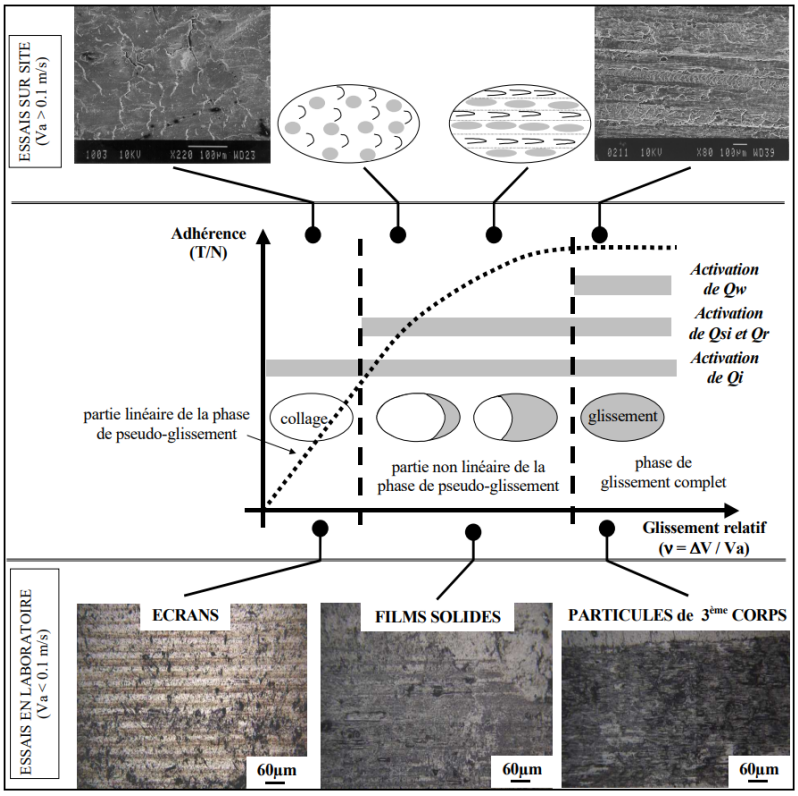


FIGURE I.52 – Contribution des troisièmes sur les variations d'adhérence à la suite d'essais en laboratoire réalisés par Niccolini [7].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

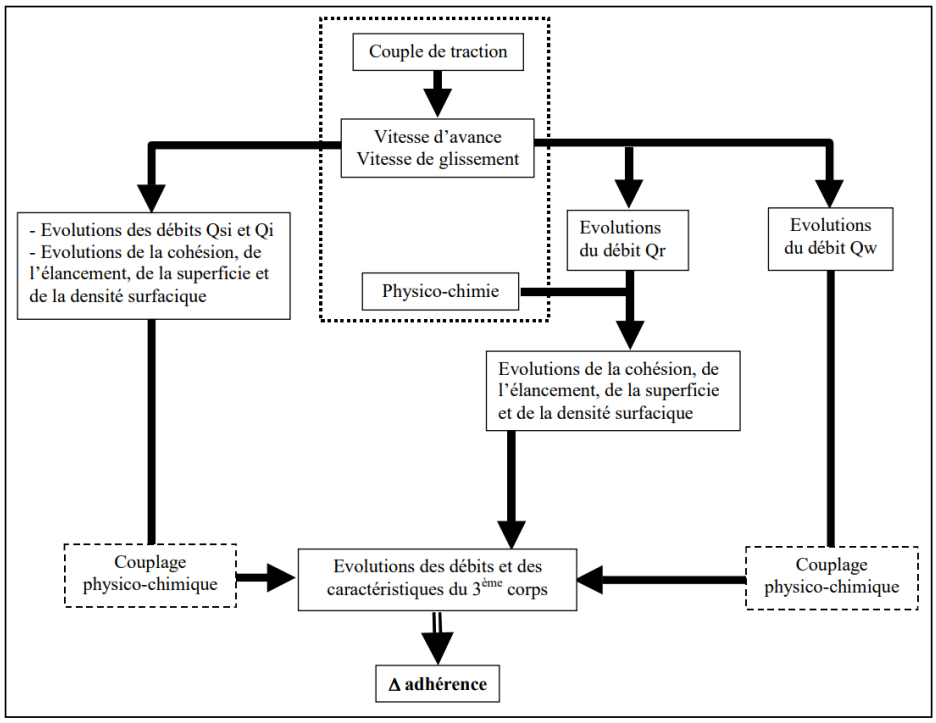


FIGURE I.53 – Synoptique d'évolution de l'adhérence d'un contact rail-roue en présence d'un troisième corps [7].

L'adhérence du contact rail-roue peut donc être étudiée d'un point de vue tribologique.
Dans le premier cas, il est nécessaire de comprendre la constitution des premiers corps (roue et rail) et leurs interactions (théories des contacts roulants, variations d'adhérence).
Dans le second cas, la connaissance des structures physico-chimiques et des différentes réactions associées aux modifications des troisièmes corps externes responsables des pertes d'adhérence est indispensable.

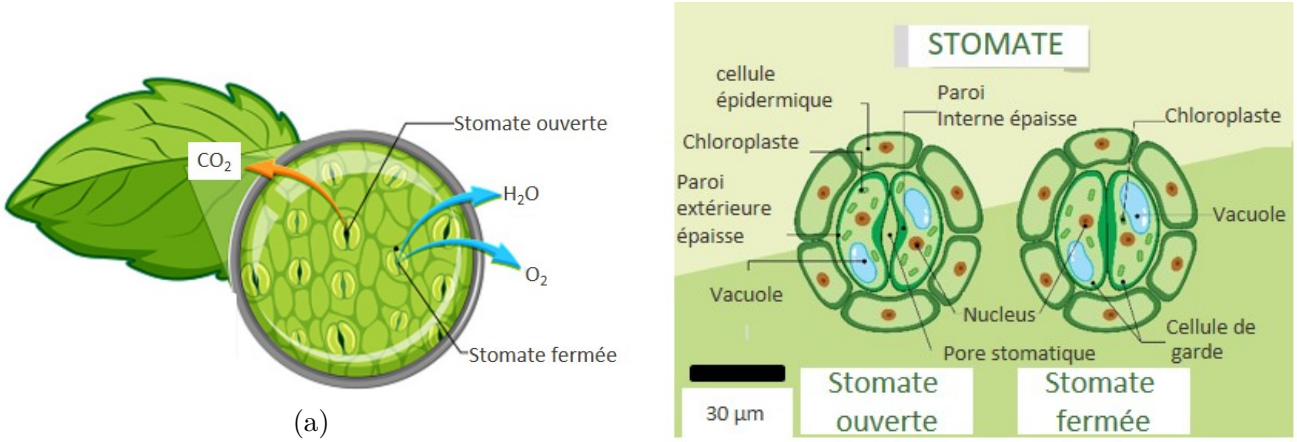
À l'heure actuelle, la présence de feuilles mortes dans un contact est considérée par de nombreux auteurs comme étant l'une des causes majoritaire de l'augmentation du nombre d'incidents d'adhérence dégradée en automne (figure I.44). Les principales études réalisées ces dernières années sont reprises sur la table I.6.

Comprendre les variations d'adhérence dues à l'ajout d'un troisième corps organique de type "feuille morte" nécessite dans un premier temps de détailler leurs structures physico-chimiques.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.4.2.3 Propriétés physico-chimiques d'une feuille d'arbre morte

Une feuille d'arbre (figure I.54) est, d'un point de vue macroscopique, une structure anisotrope composée de trois principales parties : tige, limbe et nervures (figure I.55a). Ces éléments sont complétés par la présence d'eau localisée dans la sève et les cellules végétales d'une plante, en particulier dans ses vacuoles (figure III.17b). De l'eau peut aussi être retrouvée dans les stomates présents dans l'épiderme d'une feuille (figure I.54). Cet organe permet aux feuilles de réaliser des échanges gazeux entre la plante et son environnement (captage de CO_2, et de O_2 utilisés pour la photosynthèse des plantes). Les stomates sont aussi à l'origine de 90 à 95% des pertes en eau par évapotranspiration des feuilles [77]. Les propriétés physico-chimiques des différents constituants d'une feuille sont donc reliées aux variations d'adhérence du contact rail-roue.

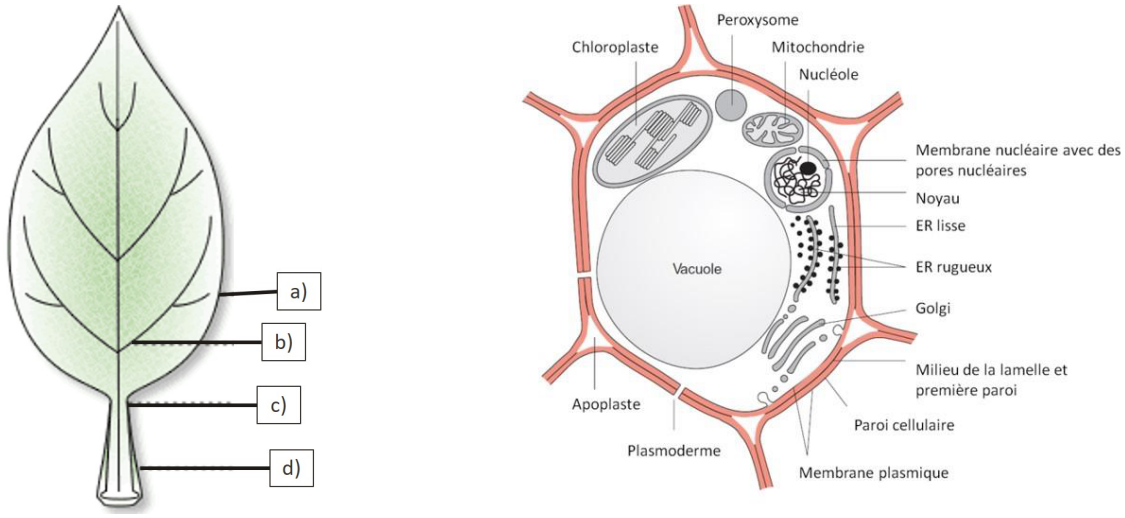


(a) (b)

FIGURE I.54 – (a) Illustration de la présence de stomates sur une feuille, (b) détail des différents constituants composant un stomate, figure issue de [78].

D'un point de vue moléculaire, ce type de biomasse est composé d'éléments chimiques communs organiques (carbone (C), oxygène (O), hydrogène (H), azote (N) et soufre (S))et inorganiques (calcium (Ca), potassium (K), silicium (Si), magnésium (Mg)). Les propriétés physico-chimiques d'une feuille sont liées à la composition chimique de ses parois. Trois principales molécules peuvent y être retrouvées [79] : cellulose, hémicelluloses, et lignines (figures I.56 et I.57). La quatrième proportion correspond à la présence d'autres composants présents en petites quantités (groupes acétyles -CH3CO, phénols -C6H6O, minéraux). On parle alors de biomasse lignocellulosique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) (b)

FIGURE I.55 – a) Schéma d'une feuille, a- limbe, b- nervures, c- pétiole, d- gaine [80] b) Schéma d'une cellule végétale (image issue de [54]).

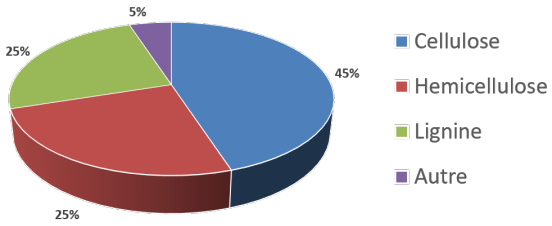


FIGURE I.56 – Proportions de molécules présentes dans une paroi végétale d'une feuille [79].

etude physico-chimique feuille

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

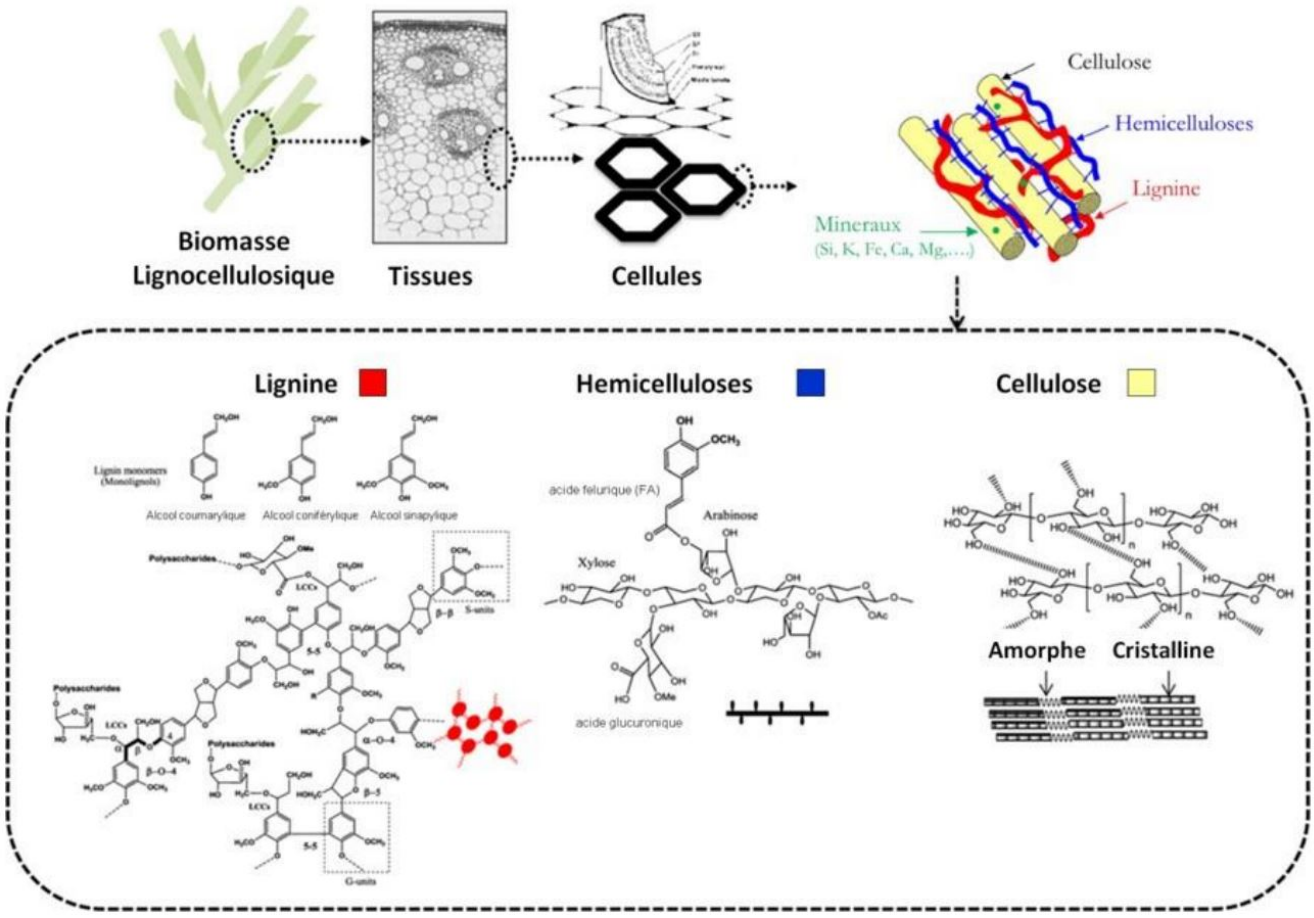


FIGURE I.57 – Composition de la paroi cellulaire d'une biomasse lignocellulosique [81][54].

Ces parois cellulaires sont divisées en deux parties [82] (figure I.58), lamelle moyenne et paroi cellulaire primaire. La lamelle moyenne permet de séparer les différentes cellules, est pauvre en cellulose, mais riche en pectine. La paroi cellulaire primaire est composée, de cellulose, d'hémicelluloses de pectine. Ces trois polymères vont conférer des propriétés mécaniques et physico-chimiques spécifiques aux biomasses étudiées. Ces dernières seront explicitées au cours du chapitre II en partie II.2.3).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

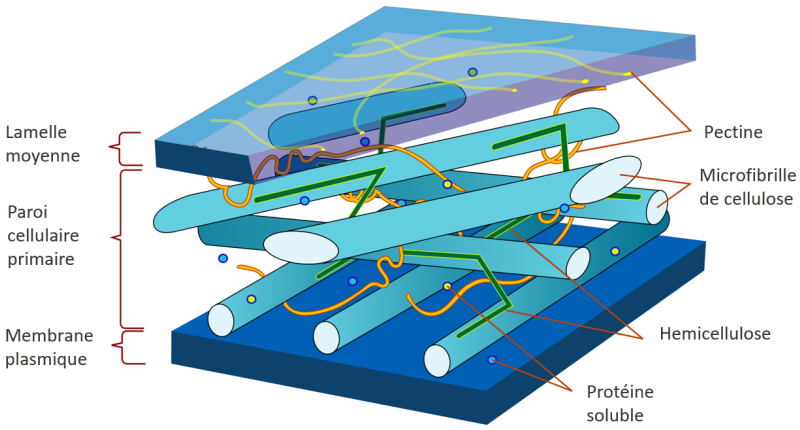


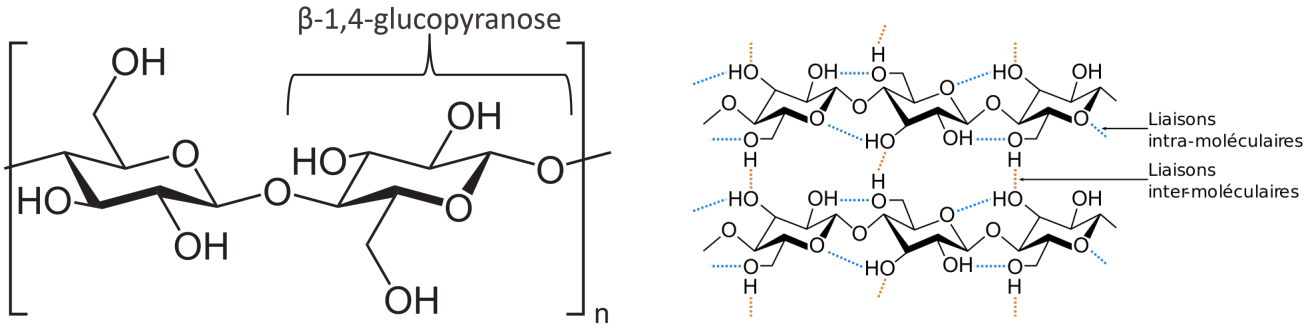
FIGURE I.58 – Détails de la composition d'une paroi ligno-cellulosique [82].

Composition chimique et structurale d'une molécule de cellulose

La cellulose est un composé organique de type polysaccharide dont la formule élémentaire est $(C_6H_{10}O_5)_n$. L'élément de base est le motif de répétition appelé cellobiose lui-même constitué d'unités de β1,4-glucopyranose (voir figure I.59) [83]. Une molécule de cellulose est constituée d'une longue chaîne linéaire d'unités de D-glucose (stéréoisomère du glucose) comprise entre 15 et 15000 molécules [84]. Chaque chaîne de polymère est liée par des liaisons non covalentes de type hydrogène ou Van der Walls. Ces dernières forment des régions cristallines (avec un nombre important de liaisons hydrogènes) dans lesquelles les molécules de cellulose sont compactées. Les microfibrilles confèrent à la macromolécule de cellulose ses propriétés mécaniques du fait de leurs résistance à la traction [85], à la dégradation chimique et biologique [54]. La cellulose est également composée de régions amorphes [86] ne se superposant pas avec les régions cristallines formées par les microfibrilles rendant la structure globale de cellulose plus forte d'un point de vue mécanique et chimique [87].

Remarque : Un polysaccharide est un polymère de la famille des glucides dont les monomères sont reliés entre eux par des liaisons chimiques covalentes entre un groupement hydroxyle (R-OH) et un groupement acide (R-CO-OH).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) (b)

FIGURE I.59 – Structure chimique de la cellulose. a) Détail du motif élémentaire de la molécule de cellulose. b) Représentation schématique d'une microfibrille comprenant deux chaînes de cellulose. [88].

Composition chimique et structurale des molécules d'hémicellulose

Les parois cellulaires des biomasses sont composées d'hémicelluloses, polymère appartenant à la famille des glucides de type polysaccharide. La structure et la composition de cette molécule est semblable à celle de la cellulose mais n'est pas dérivée uniquement d'un glucose. En effet, les hémicelluloses sont composées de divers sucres formant des chaines de l'ordre de 500 à 3000 unités. En plus du glucose, ses principaux monomères peuvent être du xylose, du mannose, du galactose, du rhamnose ou de l'arabinose. Les formes prédominantes [89] de ces glucides sont visibles sur la figure I.60.

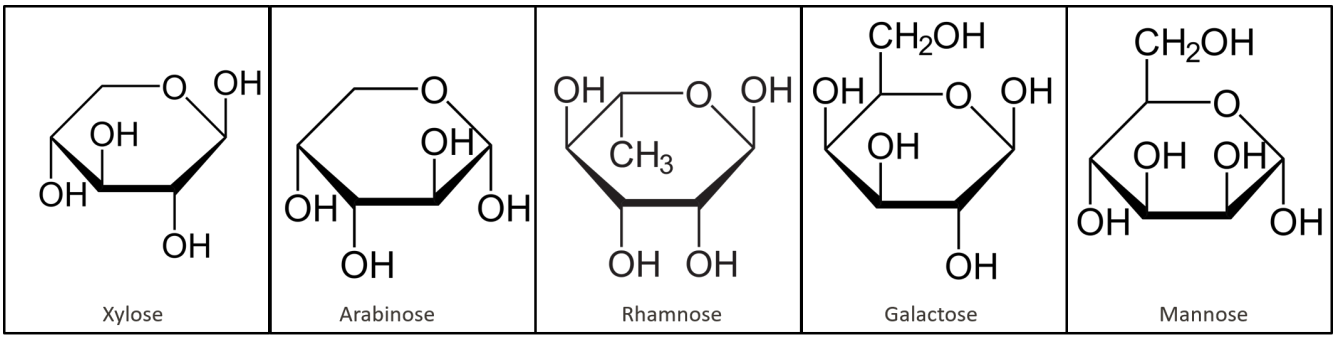


FIGURE I.60 – Listes de principales formes d'hémicelluloses, seules les structures des isomères prédominants sont mentionnées [89].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Composition chimique et structurale des molécules de lignine

Une molécule de lignine est un polymère ayant une structure phénolique. Elles sont composées de cycles aromatiques, et contiennent de nombreuses liaisons carbone-carbone simples et doubles. Les lignines sont des polymères de monolignols (composés phytochimiques servant de source pour la biosynthèse des lignines) retrouvables sous trois principales formes : alcool coumarylique, alcool conférіques, alcool sinapylique. La structure de ces trois alcools est visible sur la figure I.61.

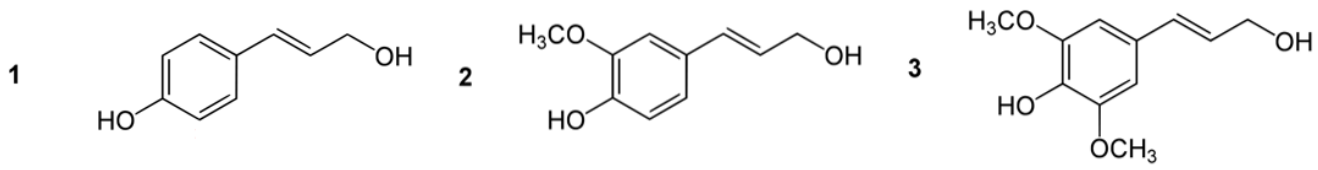


FIGURE I.61 – Listes de principales formes de lignine (structure de trois monolignols) existantes. 1 : alcool paracoumarylique. 2 : alcool conifériylique. 3 : alcool sinapylique.

La lignine compose les parois cellulaires d'une plante (avec la cellulose et les hémicelluloses) et est à l'origine du caractère hydrophobe de ces parois. Ces polymères représentent entre 26 et 34% pour les résineux et entre 23 et 30% [90]. Ils permettent le transport d'eau et de minéraux dans une plante, et assurent la rigidité des parois cellulaires ainsi qu'une grande résistance à la décomposition.

Composition chimique des molécules de pectine

La paroi cellulaire primaire ainsi que la lamelle moyenne d'une plante est aussi constituée de pectine, polysaccharide et est riche en acide galacturonique (figure I.62). Ce polymère aide à lier les différents constituants d'une paroi pectocellulosique. Il reste néanmoins l'un des polysaccharides les plus fragiles dans ces parois [91] et peut être dépolymérisé par un apport de chaleur modéré en milieu acide et neutre.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

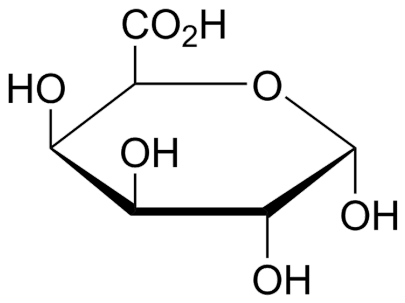


FIGURE I.62 – Structure de l'acide galacturonique, principal constituant des molécules de pectine.

Comprendre les liens entre la structure chimique et les propriétés mécaniques des molécules d'une feuille d'arbre sert à identifier des couplages pluridisciplinaires corrélés à l'adhérence d'un contact rail-roue. Elle dépend des types de troisièmes corps internes et externes au contact. L'ajout d'eau au contact va (par exemple) améliorer l'adhérence lorsqu'elle est présente en grande quantité et la réduire lorsque présente en faible quantité [60].

Parmi l'ensemble des troisièmes corps repris dans ce chapitre, l'introduction de feuilles mortes dans un contact rail-roue fait partie des principales causes d'enrayage et de patinage survenant sur un réseau ferroviaire.
De nombreux auteurs ([92][93][94][95][54]) ont pu mettre en évidence au travers d'essais sur système réel ou différents tribomètres, des liens entre la présence de ce troisième corps externe, et la diminution de l'adhérence disponible. Les principaux résultats issus de ces études sont présentés ci-après.

I.4.3 Etude d'un troisième corps particulier : influence de la végétation et des variations d'hygrométrie relative sur l'adhérence du contact rail-roue

Nous avons donc vu dans les parties précédentes que les caractéristiques et débits tribologiques des troisièmes corps influent sur les variations d'adhérence d'un contact rail-roue. Les éléments mentionnés sur les figures I.45 et I.44 ont permis de mettre en évidence le fait que la majorité des enrayages et patinages survenant sur une année se déroulent en automne (figure I.44), et principalement le matin lorsque les valeurs d'hygrométries relatives de l'air sont les plus fortes. Les périodes de chutes de feuilles et de forts gradients d'hygrométrie coïncident donc généralement avec l'augmentation du nombre d'incidents quotidiens liés à une perte d'adhérence.

Ainsi, certaines feuilles tombées de leurs arbres à proximité de la voie peuvent après passage d'un train, être projetées sur les rails (figure I.63a). Elles adhérent au rail grâce à la présence

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

d'humidité pour être ensuite écrasées par des essieux.

(a) (b)

FIGURE I.63 – a) Aperçu de la projection de feuille générée par le flux d'air du passage du train (entouré jaune : feuilles en mouvement) b) Aperçu de feuilles écrasées générant une pâte noirâtre adhésive sur la surface d'un rail. Photo prise après une chute d'arbre sur la voie en raison d'intempéries.

À l'échelle du contact, la présence de feuilles écrasées modifie la nature du troisième corps. Celui-ci en présence d'eau devient glissant et génère une adhérence insuffisante pour transmettre des efforts de traction et freinage. De nombreuses études ayant pour but de quantifier l'influence d'un troisième corps composé de feuilles mortes écrasées ont été recensées ces dernières années par Ishizaka [56]. Elles sont visibles sur le tableau I.6. Ces données permettent de quantifier les différents facteurs de frottements obtenus au cours d'essais reproduisant des pertes d'adhérence en présence de feuilles mortes sèches et/ou humides au contact.

Les résultats de la synthèse visible en figure I.6 ont permis de montrer que l'hygrométrie relative de ces troisièmes corps influe sur les variations d'adhérence. Lorsqu'une feuille est écrasée en présence d'une faible quantité d'eau, une pâte noirâtre glissante est formée sur la surface du rail. Celle-ci agit comme un revêtement glissant (faible transmission des efforts tangentiels générés par le contact rail-roue), et dégrade très fortement l'adhérence lors du passage d'un train [67], [93] (figure I.63b).
Cette synthèse permet aussi de mettre en évidence le fait que les résultats obtenus dépendent du type de tribomètre et des taux de glissement appliqués. Deux exemples de banc sont visibles sur la figure I.64.

Ainsi, un tribomètre de type pion-disque ne peut être utilisé pour reproduire un contact roulant. Un tribomètre de type bi-disque le peut tout en contrôlant le taux de glissement imposé au contact.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Référence bibliographique	Méthode d'essai (nature du tribomètre utilisé)	Type de feuille essence	Conditions d'essais	Facteur de frottement mesuré
[96]	Bi-disque	Sycomore (coupées)	Feuilles sèches Vitesse moyenne : 1m/s Taux de glissement : 0.5, 1, 2% Pression de contact moyenne : 1.2 GPa	<0.05 (valeur moyenne)
[97]	Pion-disque	Orme (broyées)	RH=40 +/- 5 et 95 +/- 5% Vitesse moyenne : 0.1 m/s Taux de glissement : 100% Pression de contact moyenne : 0.8 et 1.1 GPa	0.25 (valeur moyenne) pour RH=40% 0.15 (valeur moyenne) pour RH=95%
[98]	Bi-disque	Mélange d'essences Erable et chêne	Feuilles sèches et mouillées 1 m/s Taux de glissement : 0.5, 1, 2, 3, 5 % Pression de contact moyenne : 1.5 GPa	<0.05 pour des feuilles sèches pour l'ensemble des taux de glissement <0.02 pour des feuilles mouillées
[93]	Sphère-plan Machine de traction miniature	Sycomore (coupées)	Feuilles mouillées Vitesse moyenne : 0.02 à 1 m/s Taux de glissement : 50% Pression de contact moyenne : 1 GPa	0.01 à 0.07 pour des feuilles de couleur marron trempée 0.04 à 0.14 pour la solution aqueuse extraite à partir de la trempe des feuilles
[99]	Bi-disque	Inconnue	Feuilles mouillées Vitesse moyenne : 1 m/s Taux de glissement : 1% Pression de contact moyenne : 1.5 GPa	<0.06
[68]	Bi-disque	Sycomore (coupées)	Feuilles sèches Vitesse moyenne : 1 m/s Taux de glissement : 0.5 % Pression de contact moyenne : 1.2 GPa	0.02 (valeur minimale)
[67]	Bi-disque	Mélange d'essences + extraction de solution aqueuse utilisée pour la préparation des feuilles Érable trempé, hêtre, chêne, bouleau	Feuilles mouillées Vitesse moyenne : 0.8 à 3 m/s Taux de glissement : 1 à 10% Pression de contact moyenne : 1 GPa	<0.1 pour le mélange d'essences environ 0.1 pour l'extraction aqueuse
[100]	Locomotive	Inconnue	Feuilles sèches et mouillées Masse des essieux : 21.5 tonnes	0.06 pour des feuilles sèches (valeur moyenne) 0.04 pour des feuilles humides (valeur moyenne)
[94]	Bi-disque	Sycomore (pâte)	Feuilles mouillées Vitesse moyenne : 1 m/s Taux de glissement : 3 % Pression de contact moyenne : 1.5 GPa	0.05 à 0.15
[101]	Tribomètre portable de type pendule frottant	Inconnue	Feuilles mouillées (pluie fine)	0.15 (valeur minimale moyenne)
[102]	Tribomètre portable	Inconnue	Feuilles sèches Pression de contact moyenne : 0.7 GPa	0.3 (valeur moyenne)
[63]	Bogie d'essai	Aiguilles de pin	Végétaux secs et mouillés Vitesse moyenne : 20 km/h	0.05 (végétaux secs, valeur minimale) 0.05 (végétaux mouillés, valeur minimale)

TABLEAU I.6 – Synthèse des études portant sur l'adhérence d'un contact rail-roue en présence d'un troisième corps externe de type "feuilles mortes" [56].

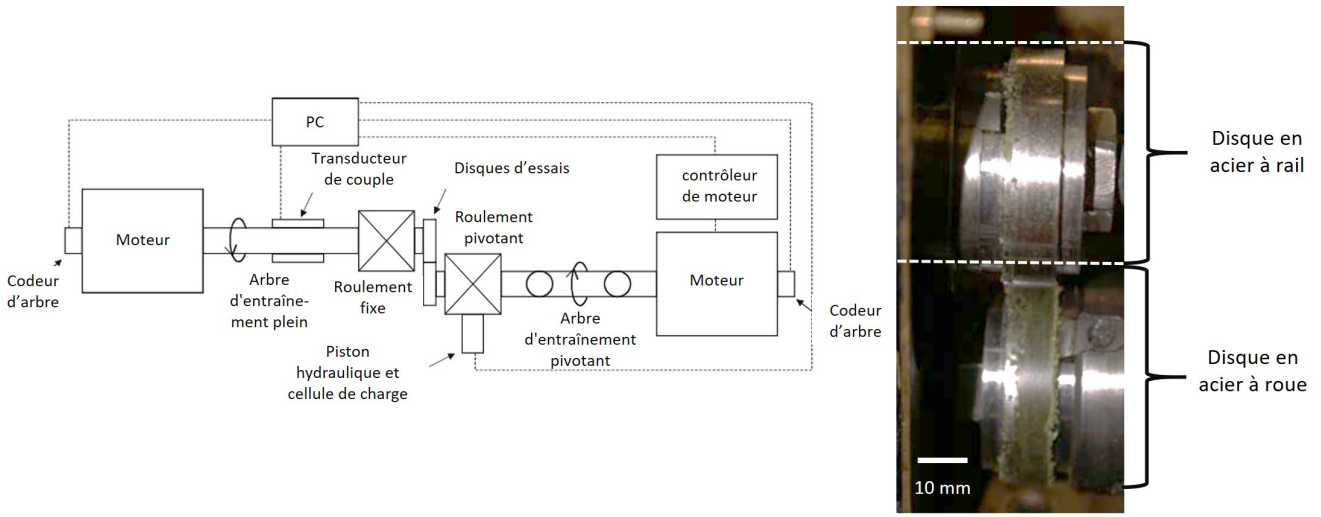
Ces éléments sont approfondis en partie II.2.2.

L'utilisation de différents tribomètres a pu être couplée à la réalisation d'essais utilisant des feuilles avec différentes hygrométries relatives. L'ensemble des données obtenues convergent vers le fait qu'une augmentation de l'hygrométrie relative des feuilles utilisées tend à diminuer les facteurs de frottement mesurés au contact. À titre d'exemple, les résultats de la figure I.65 issus des travaux de Gallardo-Hernandez et al. [98] illustrent la diminution des facteurs de frottement pour différents troisièmes corps externes.

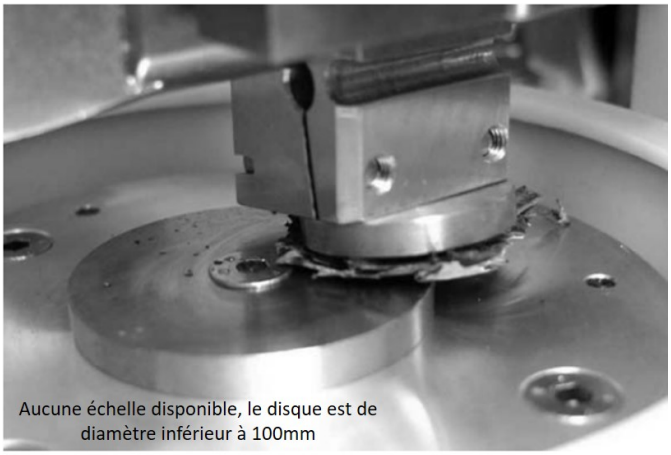
À l'heure actuelle, les mécanismes tribologiques d'adhésion de cette couche à la surface du rail ne sont que très partiellement décris. Néanmoins, différentes hypothèses visant à les expliciter sont formulées à partir de données physico-chimiques et mécaniques. Les résultats des principales études portant sur ce sujet sont détaillés ci-après.

Olofsson [104] développe un modèle multicouche permettant de préciser des mécanismes de formation et d'adhésion au rail d'une couche de feuilles écrasées. Cet auteur considère, à partir d'essais en laboratoire utilisant un tribomètre de type pion-disque, un modèle dont la surface est

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)

FIGURE I.64 – Tribomètres utilisé lors d'essais visant à étudier l'influence de la présence de feuilles mortes introduites dans un contact rail-roue. a) Tribomètre de type bi-disque utilisé par Li et al. [96] b) Tribomètre de type pion disque utilisé par Olofsson et al. [103]

composée d'une première couche peu adhérente constituée principalement de phosphore et de calcium produit par l'écrasement de feuille. La seconde est une couche peu résistante à un cisaillement formée par réaction chimique. La dernière correspond à la surface originelle d'un rail. Il explicite le fait que la couche de végétaux écrasés transfert des composés organiques (carbone, azote, calcium) réagissant avec une couche d'oxydes de fer présente naturellement sur un rail. Ces résultats sont principalement obtenus à l'aide d'analyses physico-chimiques réalisées par spectrométrie optique à décharge luminescente. Un exemple de résultat est visible en figure I.66b.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

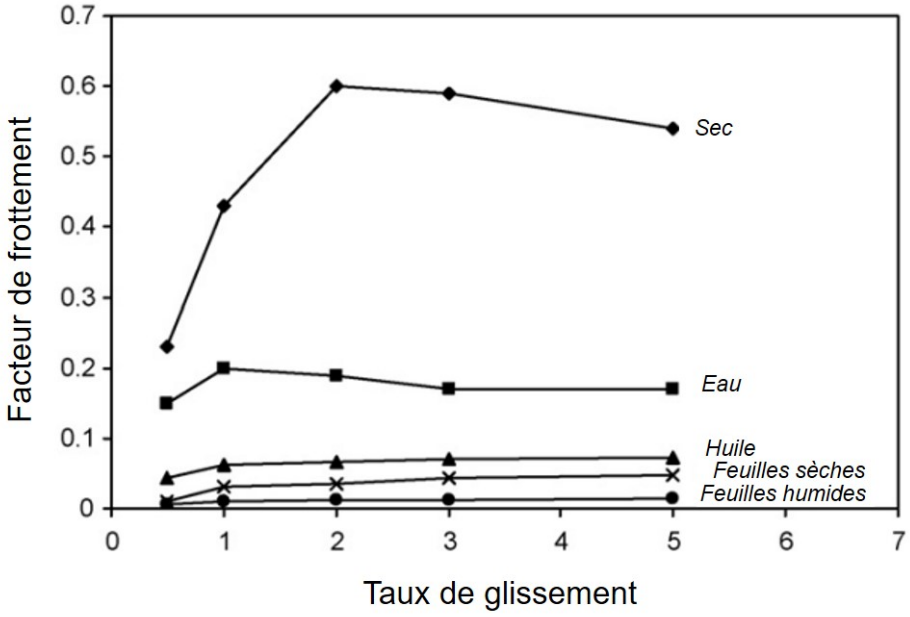
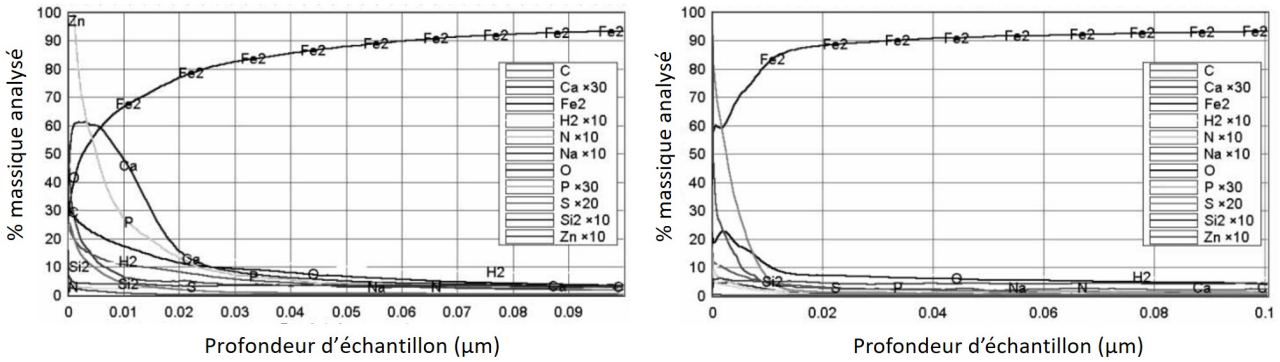


FIGURE I.65 – Evolution du facteur de frottement mesuré lors de la réalisation d'essais sur tribomètre de type bi-disque pour différents taux de glissement en présence de feuilles mortes sèches, humides, d'eau et d'huile [98].



(a) (b)

FIGURE I.66 – Analyse par spectrométrie optique à décharge luminescente a) d'une feuille de charme présente sur la surface d'un rail, b) de la surface d'un rail sans couche de troisième corps externe organique.

La présence d'oxygène dans les couches de troisièmes corps formés au cours de ces essais est suggérée par Olofsson [104] comme étant à l'origine de leur forte adhésion avec la surface d'un rail. En se basant sur la synthèse des travaux visibles en figure I.6, Ishizaka et Lewis [56] proposent un mécanisme d'adhésion de ce troisième corps externe. Ils parviennent à le reproduire en utilisant un tribomètre de type bi-disque (figure I.64a).

Ce mécanisme est basé sur la réalisation d'analyses tribologiques de "feuilles mortes humides"

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

ayant fait l'objet d'un broyage et d'une réduction sous la forme de poudre. Le diamètre de grain maximum obtenu est de 800µm (figure I.67). La réalisation d'analyses physico-chimiques des premiers et troisièmes corps introduits dans le contact a montré la présence de graphite retrouvé en surface des troisièmes corps formés.

Ce composé joue un rôle de lubrifiant solide et a été mis en évidence au travers d'analyses spectrales faites sur des échantillons de troisièmes corps poudreux pour des taux de glissements de 0.5, 1 et 2%.

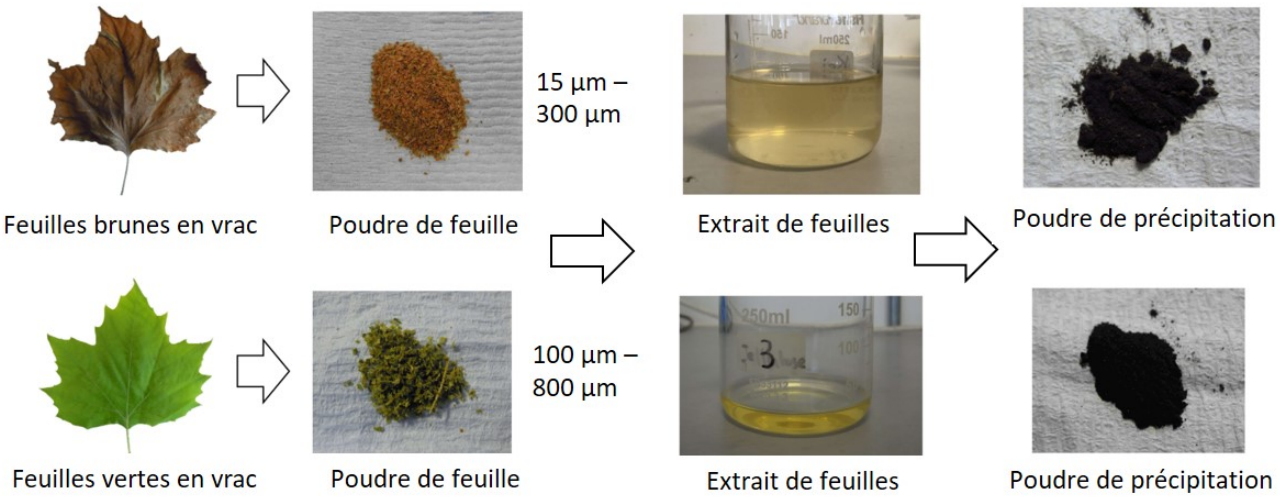


FIGURE I.67 – Préparation des échantillons utilisés par Ishizaka et al. lors d'essais visant à étudier l'influence de feuilles mortes sur l'adhérence d'un contact rail-roue [105].

La diminution du facteur de frottement associée à la présence de feuilles humides est explicitée par cet auteur. Les analyses physico-chimiques réalisées permettent de décrire trois phénomènes en lien avec cette diminution. Ils sont tous basés sur la présence d'eau en surface des premiers corps :

- Le premier phénomène correspond à une éjection d'acides organiques issus des troisièmes corps externes et reliée à l'application de sollicitations mécaniques. Ces acides sont mélangés à l'eau présente en surface des rails (figure I.68).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

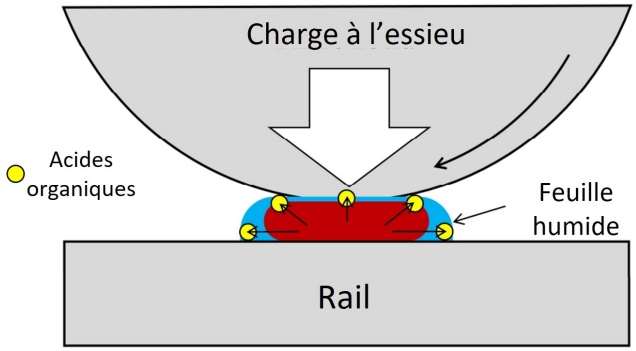


FIGURE I.68 – Création d'une couche de troisième corps organique issues de sollicitations mécaniques et de transformations physico-chimiques [105].

- Le second phénomène est lié à des aspects physico-chimiques portant sur la transformation de la couche de troisième corps organique formée en une couche souple de graphite (figure I.69).

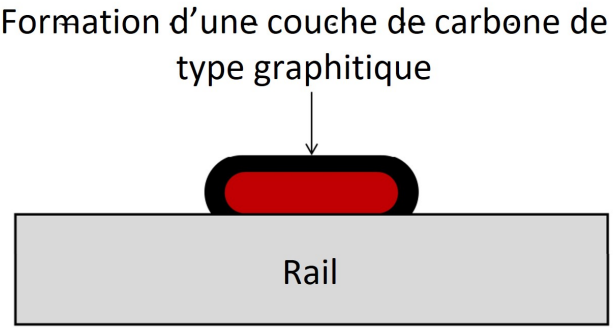


FIGURE I.69 – Graphitisation de la surface du troisième corps formé après introduction de feuilles mortes humides au contact [105].

- Le troisième et dernier phénomène est de nouveau lié à des aspects physico-chimiques couplés à des sollicitations mécaniques. Le nouveau passage d'une roue sur le troisième corps formé génère une diminution du facteur de frottement et des glissements localisés induits par la présence de graphite.
  Ce glissement déforme la couche graphitique et l'entraîne sur la circonférence d'une roue. L'augmentation du nombre de roues passées au contact supprime les couches superficielles de graphite et redémarre le processus associé au premier phénomène (figure I.70).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

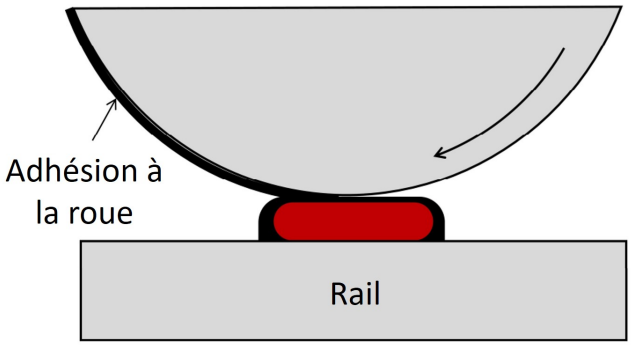


FIGURE I.70 – Création d'une couche de troisième corps organique issues de sollicitations mécaniques et de transformations physico-chimiques [105] et adhérent à la surface des roues.

En somme, la démarche de travail suivie par Ishizaka et al. [105] a permis de mettre en évidence des mécanismes associés à l'obtention de faibles facteurs de frottements liés aux transformations physico-chimiques d'un troisième corps organique de type "feuilles mortes humides, broyées". L'utilisation d'un tribomètre de type bi-disque et de type sphère-plan ont appuyé les résultats physico-chimiques obtenus et basés sur la nécessité d'une présence d'eau en surface des premiers corps.
Cependant, les mécanismes d'adhésion d'une couche de troisièmes corps organique à la surface d'un rail n'ont pu être précisés par cet auteur.

Plus récemment, Bringel [54] à la suite des travaux réalisés par Ishizaka [56] a pu expliciter les principales réactions physico-chimiques à l'origine des mécanismes d'adhésion à la surface des rails d'une couche de troisième corps organique. Cette caractérisation de transformations physico-chimiques est effectuée à l'aide d'un tribomètre de type broyeur à anneau et de l'utilisation de feuilles d'érable et de charme. La démarche suivie est schématisée sur la figure I.71

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

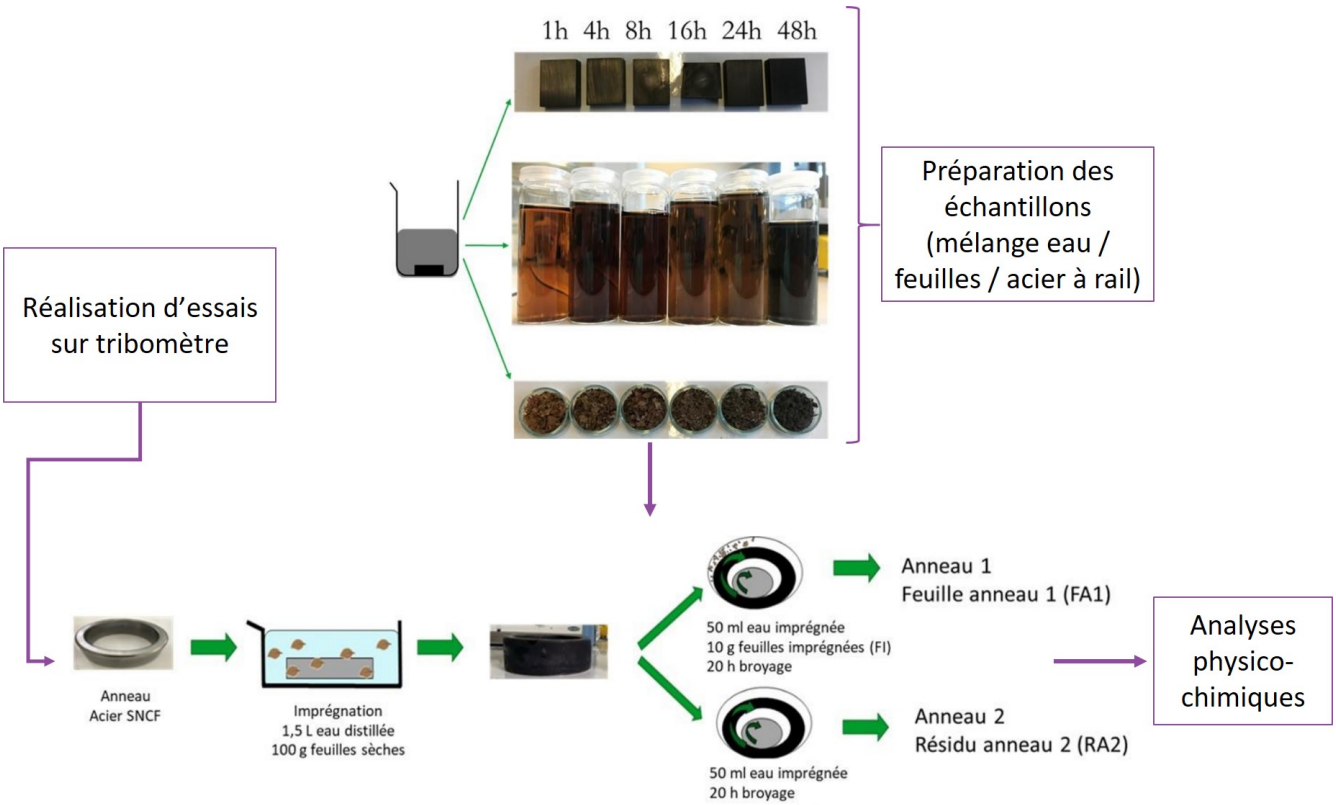


FIGURE I.71 – Démarche d'analyse suivie par Bringel pour la caractérisation physico-chimique des mécanismes d'adhésion d'une couche de troisième corps organique à la surface d'un rail [54].

Cet auteur montre que plusieurs réactions surviennent entre une feuille morte et les composés physico-chimiques présents en surface d'un rail humide. Ces réactions sont à l'origine des mécanismes d'adhésion de ces troisièmes corps externes à la surface des rails.

Une première réaction chimique correspondant à une acidification des milieux se produit grâce à la dégradation des parois végétales des feuilles mises en contact avec de l'eau (condensation, pluie...).

Après une courte période, généralement quelques heures, les composants chimiques des feuilles mortes dégradées (principalement lignine et cellulose) réagissent avec le fer issu de l'acier à rail pour former des ions Fe^{3+} et Fe^{2+}. L'acidification du milieu due à la dégradation des feuilles tend à oxyder et à dissoudre les ions Fe^{3+} dans les 15 premiers µm de la surface d'un rail humide.

Associées à cette dissolution, des porosités sont créées. Des biopolymères issus des réactions chimiques entre feuilles mortes, eau et composés inorganiques sont formés et adsorbés. Ces différentes réactions chimiques entre feuilles et rails se produisent naturellement sans sollicitations mécaniques.

Le passage de la roue d'un train sur ces complexes chimiques va transformer la cémentite

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

présente en surface d'un rail en graphite, et être à l'origine de la perte du contact électrique d'une roue de train et de son rail [73].

L'application de contraintes mécaniques (passage d'un train) entraîne la création d'une couche de troisième corps d'épaisseur variable, de couleur noire, et adhésive à la surface du rail. Ces éléments sont synthétisés sur la figure I.72.

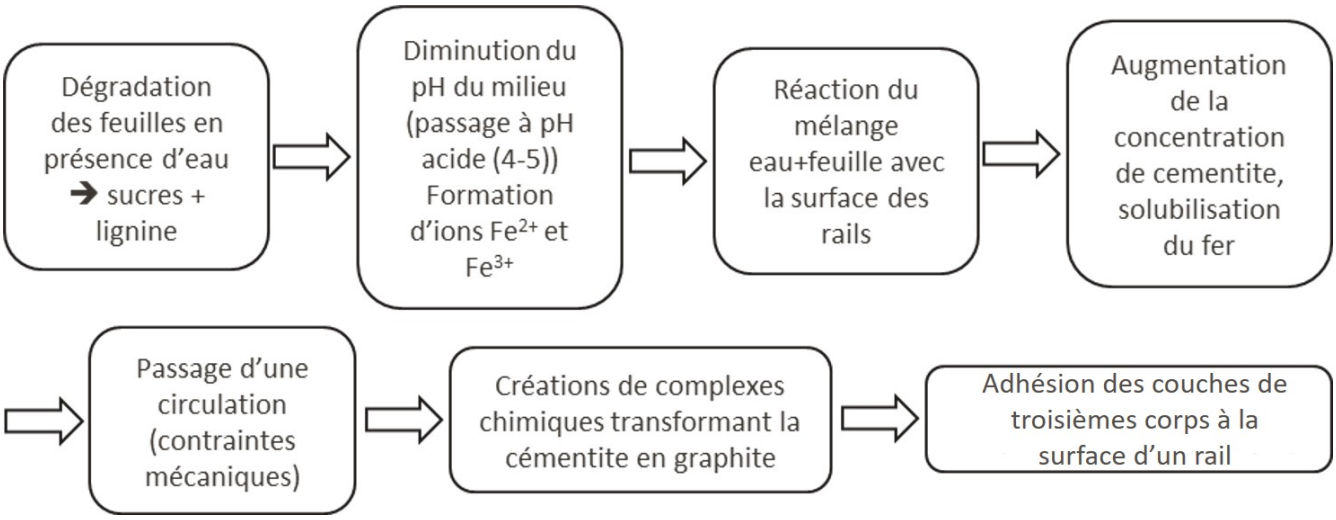


FIGURE I.72 – Synthèse des mécanismes d'adhésion d'un troisième corps externe de type "feuilles mortes humides" sur la surface d'un rail proposé par Bringel [54].

Les résultats des études présentées dans cette section confirment donc le fait que la présence de feuilles mortes écrasées au contact est à l'origine de la création d'un troisième corps externe réduisant l'adhérence des trains. La mitigation de ces phénomènes peut être réalisée à partir de l'utilisation de moyens mécaniques visant à supprimer la couche organique formée sur la surface d'un rail. Cela est fait grâce à l'utilisation de trains laveurs et brosseurs de rails [106], ou encore par ajout de sable ou de solutions abrasives [96, 68] au contact.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

I.5 Organisation des travaux de recherche

Cette étude bibliographique a pu mettre en évidence deux types de variations d'adhérence au sein d'un contact rail-roue.
Lorsque ce contact n'est pas pollué par un troisième corps externe, les variations d'adhérence sont liées aux différents constituants du triplet tribologique défini pour ce cas d'étude en partie I.2.6. Les variations et activations des débits sources internes, de recirculation, et d'usure sont à l'origine d'un couplage physico-chimique, et mécanique modifiant la cohésion et l'élancement des troisièmes corps au contact.
L'ajout d'un troisième corps externe (graisse, feuille, eau...) modifie l'adhérence disponible au contact. La présence sur la surface d'un rail, de feuilles mortes écrasées par le passage d'un train a pu faire l'objet de nombreuses études synthétisées par Ishizaka *et al.* [56]. Cette synthèse bibliographique reprise en partie I.4.3 a permis d'identifier des conditions d'obtention menant à de faibles facteurs de frottement ($\mu < 0.05$). Ces derniers sont inférieurs à 0.1 lorsque des feuilles mortes sèches sont utilisées tant sur des bancs d'essais que sur des systèmes à échelle 1. Ce même facteur de frottement peut aussi être inférieur à 0.05 lorsque des feuilles mortes, humides, sont utilisées. Ce cas d'étude accentue les phénomènes de patinage et d'enrayage.

L'objectif de ce travail de thèse consiste donc à étudier l'adhérence du contact rail-roue en prenant en compte les couplages tribologiques associés à la présence de feuilles mortes au contact et pour différentes hygrométries relatives. Pour cela 4 chapitres seront utilisés pour répondre à cette problématique :

- Ce premier chapitre a servi à comprendre les enjeux liés à la maîtrise de l'adhérence du contact rail-roue, et de mettre en évidence ses fragilités d'un point de vue tribologique lors de la présence d'un troisième corps externe organique.
- Le second chapitre consiste à identifier à partir d'éléments issus de retours d'expériences industriels techniques et scientifiques et des données bibliographiques de ce chapitre, les principaux paramètres influant sur l'adhérence du contact rail-roue. Cette étape est réalisée à partir de la synthèse de retours d'expériences réalisés sur l'incidentologie automnale liée aux enrayages et aux patinages survenus ces trois dernières années en France. Ces résultats permettent de confirmer les notions bibliographiques mentionnées sur la partie I.4.2. Ils permettront aussi de mettre en évidence les moyens d'essais à utiliser nécessaires dans l'étude des couplages mécaniques, tribologiques et physico-chimiques liés à l'adhérence du contact rail-roue. Ce chapitre explicitera les manques scientifiques associés aux travaux bibliographiques existants à ce jour afin de proposer une démarche d'étude tribologique ayant pour but d'affiner la compréhension des phénomènes de pertes d'adhérence en présence de troisièmes corps externes organiques.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

- Le troisième chapitre consiste en une campagne d'essais réalisée sur tribomètre de type galet sur couronne, Triboring. Cette campagne vise à reproduire des phénomènes de perte d'adhérence causés par la présence de feuilles mortes sur la surface d'un rail dans des conditions données et justifiées à l'aide d'éléments issus du chapitre II.
- Le quatrième chapitre présentera les résultats d'une étude paramétrique sur l'adhérence d'un contact rail-roue en présence de feuilles mortes pour différents taux d'hygrométrie. L'objectif de cette partie est d'approfondir les liens entre variations mécaniques et physico-chimiques de l'adhérence du contact rail-roue.
- Enfin, le cinquième et dernier chapitre consiste en une synthèse et une conclusion des éléments mentionnés au cours des chapitres I à IV.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre II

Du retour d'expérience industriel à la nécessité de reproduire des pertes d'adhérence dans des conditions contrôlées

Sommaire

II.1 Positionnement et objectifs des travaux de recherche 89
II.1.1 Limitations actuelles 89
II.1.2 Positionnement des travaux de recherche 92
II.2 Justification des paramètres d'études 95
II.2.1 L'utilisation de retours d'expériences techniques 95
II.2.2 Justification des moyens d'essais et d'analyses 102
II.2.3 Méthodes et outils d'analyse 107
II.3 Etude préléminaire : obtention d'éléments de références portant sur l'analyse morphologique et physico-chimique de troisièmes corps réels 120
II.4 Conclusions 134

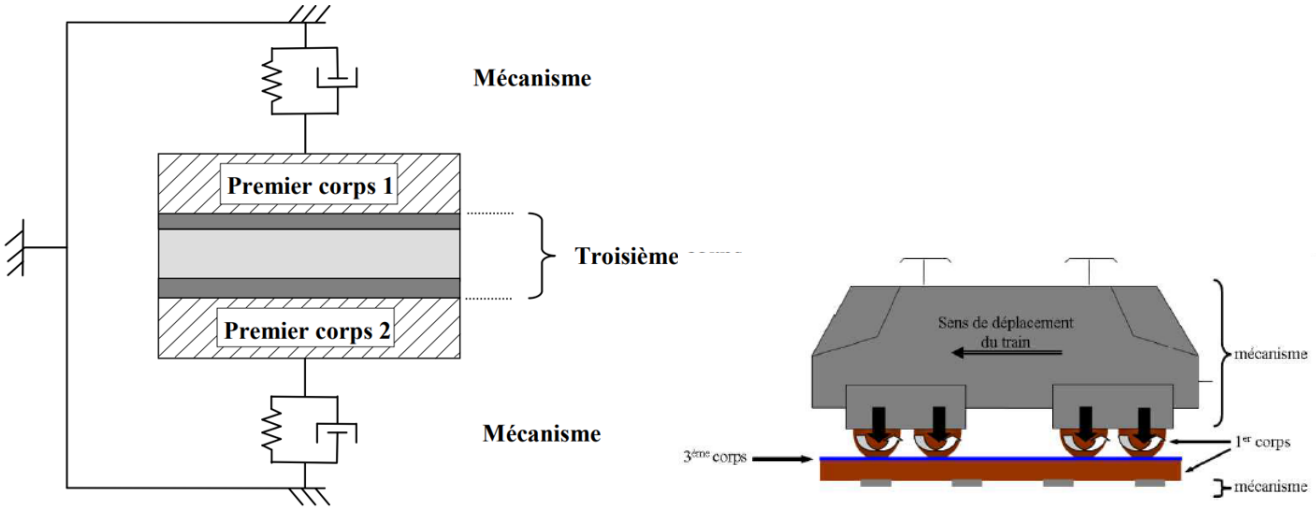
Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

II.1 Positionnement et objectifs des travaux de recherche

II.1.1 Limitations actuelles

II.1.1.1 Respect des circuits tribologiques

Les éléments bibliographiques mentionnés au cours du chapitre 1 ont permis d'expliciter les principaux travaux associés à la compréhension des phénomènes tribologiques liés à l'occurrence d'une perte d'adhérence. La présence de feuilles mortes humides sur la surface d'un rail a notamment pu faire l'objet d'études approfondies visant à clarifier les mécanismes physico-chimiques et mécaniques associés à un enrayage ou un patinage. Les éléments scientifiques formulés sont principalement obtenus au travers de la réalisation d'essais en conditions contrôlées (pression de contact, taux de glissement, ...) effectués sur tribomètre (figure I.6). L'utilisation d'un tribomètre peut néanmoins soulever des questions associées à la validité de la reproduction des phénomènes observés sur un système réel. La description du triplet tribologique relié à un contact rail-roue composé d'un troisième corps externe permet de mettre en évidence ces limitations (figure II.1).



(a) (b)

FIGURE II.1 – Triplet tribologique : a) Forme théorique [107] b) Application au contact rail-roue ferroviaire [44].

En effet, un contact rail-roue ferroviaire est de par sa nature roulant. L'obtention de zones de glissement et d'adhérence au sein de l'ellipse de contact (partie I.3.2) dépendent du taux de glissement imposé, des efforts normaux couplés aux raideurs et amortissements du système. Ces derniers paramètres servent ainsi à définir les éléments constituants la partie "mécanisme" du triplet tribologique de ce contact.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour l'étude de l'adhérence d'un contact rail-roue, l'utilisation d'un tribomètre doit ainsi prendre en compte les différents taux de glissement appliqués au contact. La réalisation d'essais utilisant un tribomètre dont la géométrie ne reproduit pas un contact roulant avec ou sans glissement ne peut donc pas servir de base à l'étude de l'influence des sollicitations mécaniques sur l'adhérence.

D'un point de vue tribologique, l'utilisation d'un banc d'essai exacerbant ou privilégient certains débits est à proscrire. À titre d'exemple les essais effectués à partir d'un tribomètre de type bi-disque sont particulièrement adaptés à la réalisation d'essais cycliques pour lesquels pression de contact et taux de glissement peuvent être contrôlés. Cependant, ce type de banc à tendance à exacerber les débits d'éjections, d'usure et de recirculation des troisièmes corps avec la diminution du rayon des pièces en contact. Il faut néanmoins rappeler que l'utilisation de tribomètres de types bi-disque permet de réaliser des essais pour lesquels les paramètres d'entrée sont facilement contrôlés.

Le choix d'un banc d'essais prenant en compte la cinématique du contact rail-roue et les circuits tribologiques correspondants est nécessaire à la réalisation d'essais valides d'un point de vue tribologique. Cela étant d'autant plus valable pour la caractérisation de l'adhérence du contact rail-roue pour différents troisièmes corps.

II.1.1.2 Couplages mécaniques et physico-chimiques associés à la structure des troisièmes corps externes étudiés

Les résultats de l'analyse bibliographique (partie I.4.2) ont mis en évidence des couplages mécaniques et physico-chimiques associés à la présence d'un troisième corps de type organique sur l'évolution de l'adhérence du contact rail-roue.
Ces couplages ont pu être explicités à l'aide de la préparation de différents troisièmes corps organiques visant à être introduits dans un tribomètre reproduisant un contact rail-roue.

Les études scientifiques récentes (reprise sur le tableau I.6) réalisées sur cette thématique ont fait l'objet de l'utilisation de feuilles mortes à différentes hygrométries relatives. Cependant, du fait du type de tribomètre utilisé, les échantillons de troisièmes corps étudiés ont souvent dû faire l'objet de modifications mécaniques importantes de leurs structures (broyage sous forme poudreuse, concassage).

L'effet de la modification de la structure d'une feuille (nervure, pétiole, limbe, figure I.55) sur les variations mesurées d'adhérence se pose alors. Des éléments de réponse peuvent être apportés au travers de l'observation d'échantillons de troisièmes corps prélevés après une perte d'adhérence d'un train. L'objectif étant de déterminer la présence d'éléments structurels d'une feuille morte

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

après incident. Ces éléments sont présentés en partie II.3.

Ces observations permettent d'expliciter les limites associées aux modifications structurelles mécaniques des troisièmes corps étudiés. Les observations et analyses à réaliser doivent à ce stade du manuscrit faire l'objet d'une présentation et d'une justification.

L'état de l'art actuel révèle deux études fondamentales dont les résultats (décrits en partie I.4), permettent de faire avancer la compréhension des phénomènes d'adhérence dégradées.
La première étude est réalisée par Ishizaka [105], ses travaux lui ont permis de proposer un mécanisme tribologique permettant de comprendre des phénomènes associés à la génération d'une perte d'adhérence des trains circulant sur une couche de feuilles mortes humides. Ce mécanisme est basé sur l'obtention de résultats issus d'essais tribologiques complétés par des analyses physico-chimiques. Les essais sont réalisés à l'aide d'un banc d'essais de type bi-disque pour lequel les conditions d'expérimentation (pression de contact, taux de glissement) peuvent être contrôlées de façon précise. Un schéma de fonctionnement de ce banc est repris en figure I.64a. Les analyses physico-chimiques sont quant à elles réalisées à l'aide de techniques permettant de caractériser la composition chimique (structure et liaisons fonctionnelles) d'un troisième corps. Ces travaux ont donc été réalisés à partir d'un couplage d'informations issus de phénomènes mécaniques et physico-chimiques.

La seconde étude fondamentale est associée aux travaux de Bringel [54] et est axée principalement sur la compréhension des phénomènes physico-chimiques liés aux mécanismes d'adhésion d'un troisième corps organique à la surface d'un rail. De façon similaire à l'étude précédente, cet auteur a pu mettre en évidence l'existence de trois types de transformations physico-chimiques.
La première survenant lors de la dégradation des parois ligno-cellulosiques d'une feuille morte en présence d'eau.
La seconde est associée à une dissolution des constituants en surface d'un rail ferroviaire engendrée par la dégradation précédente des feuilles.
La troisième est quant à elle initiée par la génération de sollicitations mécaniques induites par le passage d'un train. Ces sollicitations ont néanmoins été reproduites à l'aide d'un tribomètre non roulant mais permettant toutefois l'application de pression de contact similaires à celles existantes sur un système réel (de l'ordre de 1 GPa).
La principale plus-value de ces travaux repose sur la mise en évidence et la caractérisation de trois types de modifications physico-chimiques des troisièmes corps organiques étudiés et complète les travaux réalisés par Ishizaka [105].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

II.1.2 Positionnement des travaux de recherche

En somme, l'ensemble des études visant à caractériser l'adhérence du contact rail-roue en présence d'un troisième corps organique ont débuté par une approche globale. Cette dernière est basée sur l'utilisation de données statistiques [57], d'essais de terrains réalisés à l'échelle 1 [108, 109] et complétée par des retours d'expériences industriels [60, 110] visant à mettre en place des moyens de prévention et de mitigation [96, 94].

Ces approches globales sont poursuivies par des approches locales expérimentales réalisées au travers d'études physico-chimiques [93, 111] et tribologiques [112, 113] (figure II.2)

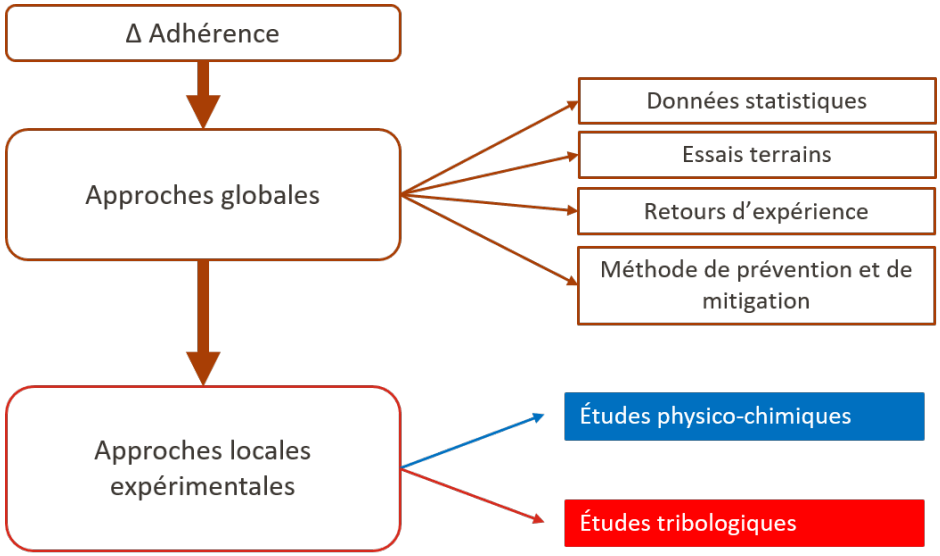


FIGURE II.2 – Types d'études réalisées sur l'adhérence du contact rail-roue en présence d'un troisième corps organique.

Les différents couplages existants entre ces deux domaines ont toujours fait l'objet d'adaptation des circuits tribologiques utilisés. La validité des résultats obtenus peut par conséquent être renforcée. L'objectif des travaux présentés dans ce manuscrit est alors de compléter les ceux menés sur l'étude de l'adhérence du contact rail-roue en présence d'un troisième corps externe organique. Pour cela, il sera nécessaire de :

1 : Respecter le circuit tribologique associé au contact rail-roue au travers d'un choix pertinent d'un banc d'essai.

2 : Coupler les résultats d'études mécaniques aux analyses physico-chimiquse *ex-situ* des troisièmes corps obtenus après essai.

3 : Proposer des critères d'évolution d'une perte d'adhérence basés sur l'étude tribologique des troisièmes corps créés sur banc.

4 : Formuler des propositions visant à réduire les effets d'une perte d'adhérence d'une circula-

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

tion ferroviaire à la suite du passage sur une couche de troisième corps organique.

L'apport d'informations visant à répondre à ces objectifs fera l'objet d'un travail purement expérimental permettant d'identifier des liens associés aux couplages mécaniques et physico-chimiques dans l'évolution de l'adhérence d'un contact rail-roue, en présence d'un troisième corps organique.

Ce travail scientifique doit aussi être complété par des données issues de différents retours d'expériences industriels techniques ayant pour but de valider le choix de paramètres d'études influents. Ces éléments sont mentionnés en **partie II.2.1**. Ils servent notamment à définir l'objet d'étude et les paramètres supposés influents sur les variations d'adhérence du contact.
L'identification de ces derniers est à coupler au choix d'un banc d'essai respectant les circuits tribologiques existants pour un contact rail-roue réel. Ces éléments sont mentionnés en **partie II.2.2**.
L'étude couplée mécano-physico-chimique des variations d'adhérence nécessite l'utilisation de grandeurs et d'outils appropriés. Les méthodes, grandeurs et outils d'analyses utilisés au cours de cette thèse sont justifiés en **partie II.2.3**.
Enfin, l'analyse *ex-situ* de troisièmes corps réels liés à des enrayages et des patinages prélevés sur site, permettra de définir des éléments de référence portant sur la morphologie, et leurs constitutions physico-chimiques. L'objectif étant alors de pouvoir les retrouver à la suite des essais réalisés. Ces éléments sont abordés au travers des résultats de deux cas d'études détaillés en **partie II.3**.

L'ensemble des éléments présentés dans ce chapitre fait partie d'une boite à outils de méthodes et d'analyses servant à caractériser l'adhérence du contact rail-roue en présence d'un troisième corps organique. Un schéma de principe résumant les éléments mentionnés dans cette section est visible en figure II.3.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

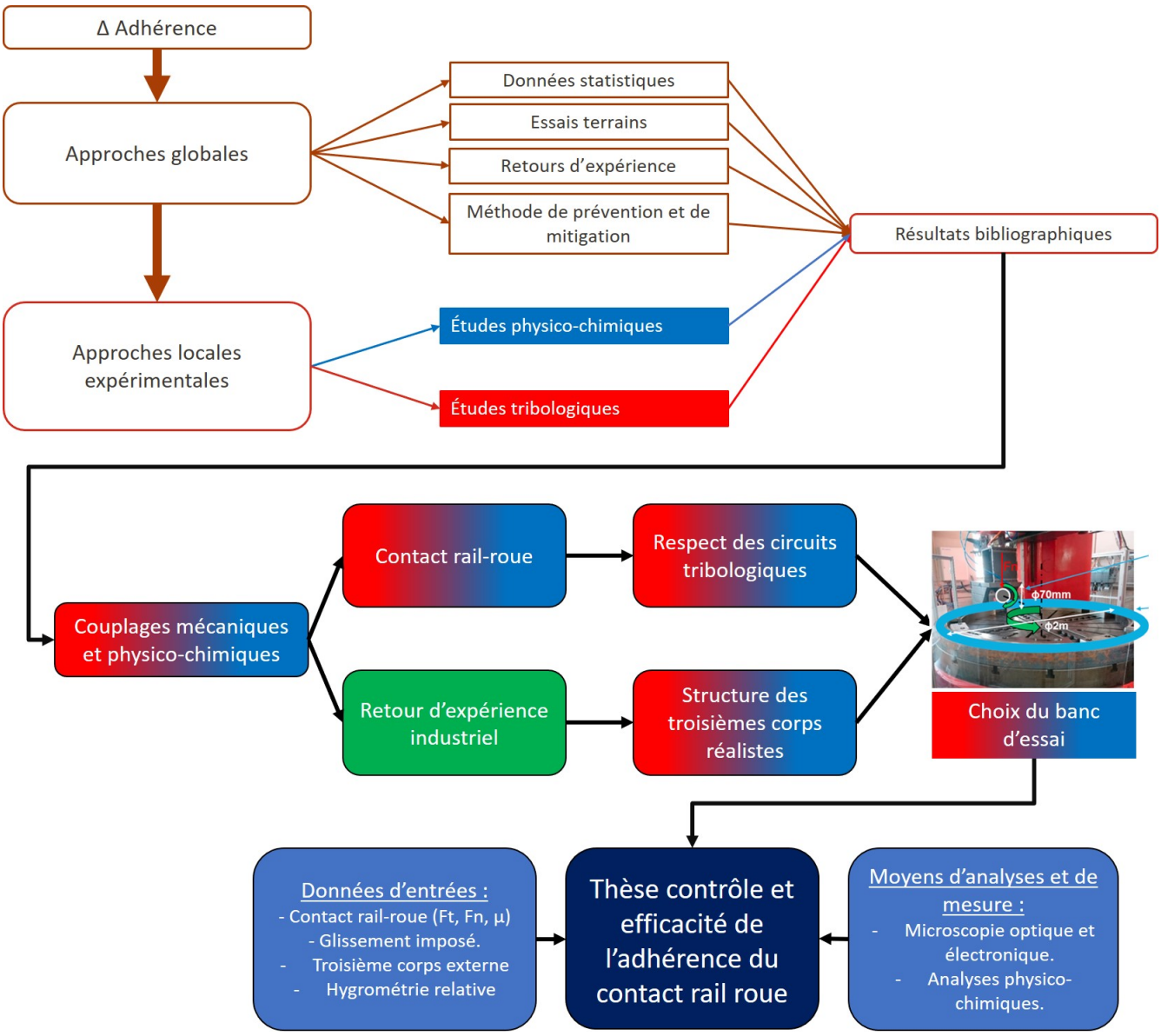


FIGURE II.3 – Organigramme de la Thèse "Contrôle et efficacité de l'adhérence du contact rail-roue".

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

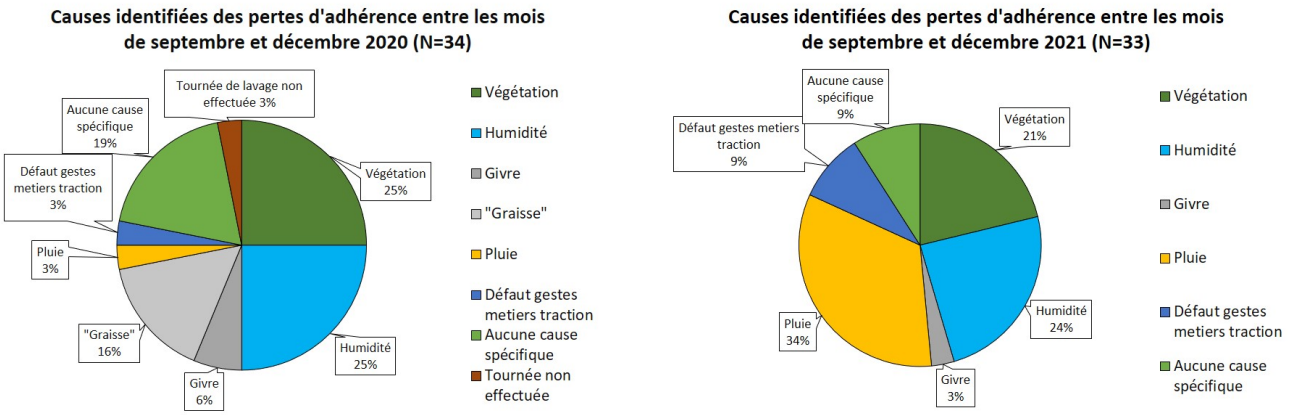
II.2 Justification des paramètres d'études

II.2.1 L'utilisation de retours d'expériences techniques

II.2.1.1 Identification des principaux troisièmes corps externes à l'origine d'incidents d'adhérence dégradée

Les incidents liés à des pertes d'adhérence (enrayages et patinages) font l'objet d'un suivi quotidien par le gestionnaire d'infrastructure ferroviaire français (SNCF Réseau) entre les mois de septembre et de décembre. Cette période est appelée "période renforcée" vis-à-vis des incidents d'enrayages et de patinages. Elle permet aussi de suivre l'ensemble des zones à risques en termes de sécurité et de régularité en lien avec l'adhérence. Pour cela, un indicateur mesurant les minutes perdues générées par chacun de ces évènements est utilisé. Ces données sont toutefois confidentielles et ne peuvent pas être diffusées dans ce manuscrit. La figure I.45 donnant la répartition de l'ensemble des incidents d'adhérence dégradée en 2018 peut être complétée par les résultats des figures II.4a et II.4b.

La présence d'une pluie fine, d'humidité, de givre et de végétaux écrasés (feuilles mortes) sur la surface des rails sont à l'origine de plus de 50% des incidents majeurs survenus sur le réseau français en automne 2020 et 2021.



(a) (b)

FIGURE II.4 – Identification de l'origine des incidents d'adhérence dégradée ayant engendrés d'importantes pertes de régularité des circulations ferroviaires. a) Automne 2020. b) Automne 2021. Données SNCF Réseau. N correspond aux nombres d'incidents ayant une forte influence sur la régularité et la sécurité des circulations vis-à-vis d'une adhérence dégradée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Ces tendances sont similaires sur le réseau ferroviaire britannique. En effet, Ishizaka et Lewis [56] ont aussi pu mettre en évidence, par un traitement statistique basé sur l'incidentologie survenue sur le réseau anglais, des liens entre l'augmentation du nombre de pertes d'adhérence et la période de la journée (figure II.5).

Le calcul d'un nombre d'incidents lié à une perte d'adhérence, normalisé par rapport au nombre de tentatives d'arrêts moyens sur une heure, révèle la présence d'une forte probabilité d'incidents entre 05h et 10h ainsi qu'entre 20h et 24h. A contrario, cette probabilité diminue de 40% entre 10h et 20h.

Les périodes pendant lesquelles les probabilités d'occurrence d'une perte d'adhérence sont hautes correspondent aussi aux périodes où l'hygrométrie relative (RH) de l'air sont les plus élevées en automne (RH>80-85%) (figure II.6).

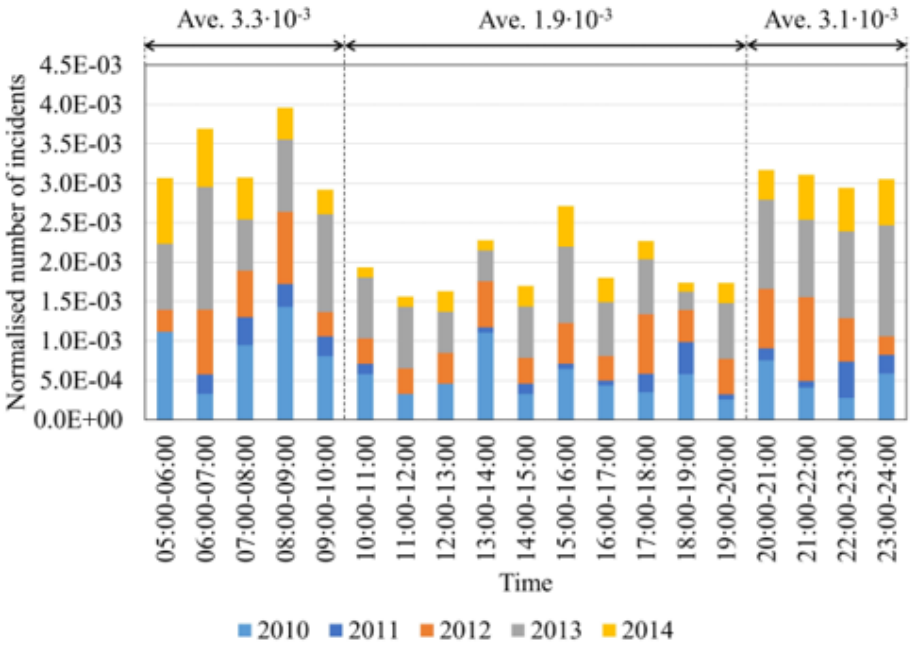


FIGURE II.5 – Répartition normalisée (relative au nombre moyen de tentatives d'arrêts sur une heure) du nombre d'incidents liés à une adhérence dégradée toute causes confondues sur le réseau anglais (automne 2010 à 2014) [56].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	4	4.3	6.7	9.9	13.4	16.4	18.5	18.1	15.5	12.1	7.7	4.7
Température minimale moyenne (°C)	1.5	1.4	2.9	5.2	8.9	11.8	14.1	13.8	11.6	8.9	5.2	2.4
Température maximale (°C)	6.5	7.5	10.7	14.5	17.7	20.7	22.6	22.3	19.5	15.5	10.4	7
Précipitations (mm)	65	55	54	55	68	65	66	74	57	63	67	74
Humidité(%)	84%	81%	77%	72%	72%	72%	71%	73%	76%	80%	86%	85%
Jours de pluie (jrée)	9	8	8	9	9	8	8	8	8	8	9	10
Heures de soleil (h)	3.3	4.1	5.5	7.9	8.5	9.1	9.5	8.9	6.9	5.3	3.7	3.2

FIGURE II.6 – Tableau de données climatique moyennes sur la région Nord-Pas-de-Calais en 2020 [114]. Ce territoire est l'un des plus concernés par l'occurrence d'incidents d'enrayage et de patinage, il est intéressant de noter la présence d'une hygrométrie relative moyenne maximale entre les mois de novembre et de février.

Ces auteurs ont aussi pu mettre en évidence des liens entre le moment d'une journée et le nombre de pertes d'adhérence causées par la présence de feuilles mortes sur les voies (figure II.7). En utilisant la grandeur normalisée précédente, la probabilité d'occurrence d'une perte d'adhérence causée par la présence de feuilles mortes est élevée entre 06h et 09h. Cette donnée est justifiée par la présence d'humidité pouvant être formée sur la surface des rails et identifiée comme un paramètre influent sur l'adhérence du contact rail-roue par White [115]. La présence d'une forte hygrométrie relative en début de journée (05h-09h) est fréquemment observée en automne lorsque la température de l'air atteint la température du point de rosée. L'humidité formée durant la nuit est absorbée par les feuilles mortes présentes sur les voies ferroviaires et est communément considérée par SNCF Réseau comme justificatif principal des pertes d'adhérence.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

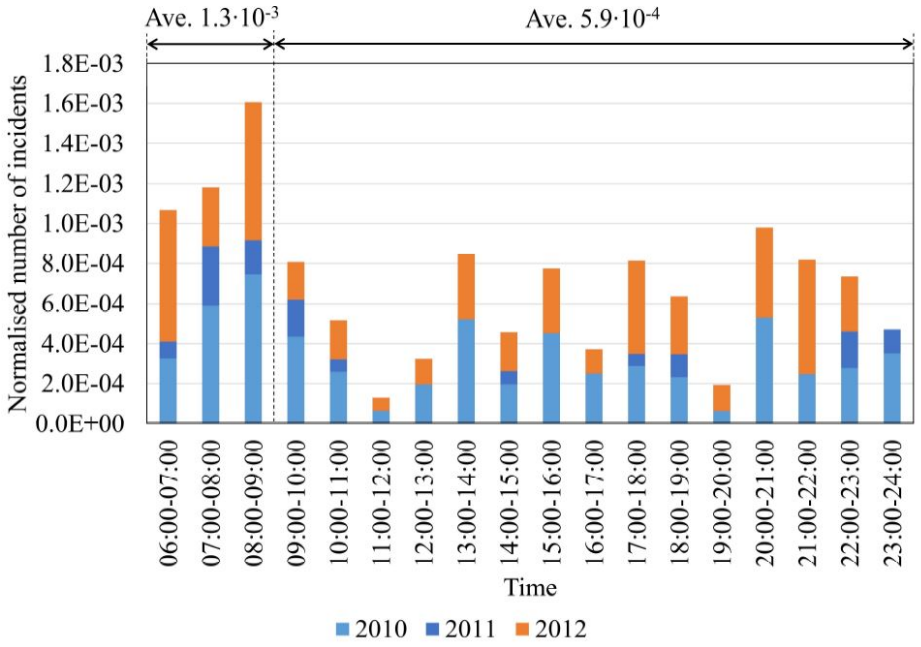


FIGURE II.7 – Répartition normalisée (relative au nombre de tentatives d'arrêts sur une heure) du nombre d'incidents liés à la présence de pollution végétale sur le réseau anglais (automne 2010 à 2012) [56].

Remarque : Bien que la présence de feuilles mortes soit identifiée comme une des causes principales à l'origine de pertes d'adhérence, la diversité biologique des espèces retrouvées après incident n'est pas prise en compte.

Les variations d'hygrométrie relative et la présence de feuilles mortes sur la surface des rails sont donc deux paramètres influant sur une perte d'adhérence d'un train. Ils servent ainsi à cadrer l'objet d'étude de cette thèse.

II.2.1.2 Gestion de l'hygrométrie relative (RH) des troisièmes corps

La reproduction des conditions d'hygrométrie relative appliquées aux troisièmes corps externes utilisés au cours de cette thèse est effectuée à partir de trois niveaux choisis : RH$\leq$35% , RH$\approx$50%, et RH$\geq$85%.
Ils correspondent à des conditions pouvant être retrouvées au cours d'une journée.
En effet, lorsque RH est inférieur à 35%, le troisième corps étudié est considéré comme sec et est représentatif de conditions d'humidité retrouvées en milieu d'après-midi.
Lorsque RH est environ égal à 50%, le troisième corps est considéré comme intermédiaire et est représentatif de conditions d'humidité retrouvées en fin de matinée.
Enfin, lorsque RH est supérieur à 85%, le troisième corps est considéré comme humide et peut être retrouvé en début de matinée et/ou de soirée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

L'hygrométrie relative des troisièmes corps externes est contrôlée à l'aide du dispositif présenté en figure II.8. Il permet d'obtenir un troisième corps externe dont l'hygrométrie relative est inférieure à 35%. Des feuilles de platane [1] sont utilisées pour la réalisation de l'ensemble des essais mentionnés sur les chapitre III et IV. Ce dispositif est constitué d'une boite hermétique percée en son fond sous laquelle est placé un dessiccateur. L'hygrométrie relative de l'air et la température à l'intérieur de la boite sont mesurées à l'aide d'un hygromètre portable. Une durée de 24h est nécessaire pour obtenir une hygrométrie relative stable et égale à 35%. Les feuilles desséchées sont alors placées sur le banc Triboring afin de réaliser différents essais d'adhérence.

L'obtention d'une hygrométrie relative supérieure ou égale à 85% est effectuée à partir de l'ajout de feuilles de platane dans un bécher d'une capacité de 2L dans lequel de l'eau distillée (dont le pH est égal à 5.8) est introduite. L'acidification du milieu permet d'initier la dégradation des parois cellulaires des feuilles (dégradation des molécules de cellulose, lignine, hémicellulose) et sera dépendante de leurs temps de maturation [54] et du taux de glissement appliqué au contact.

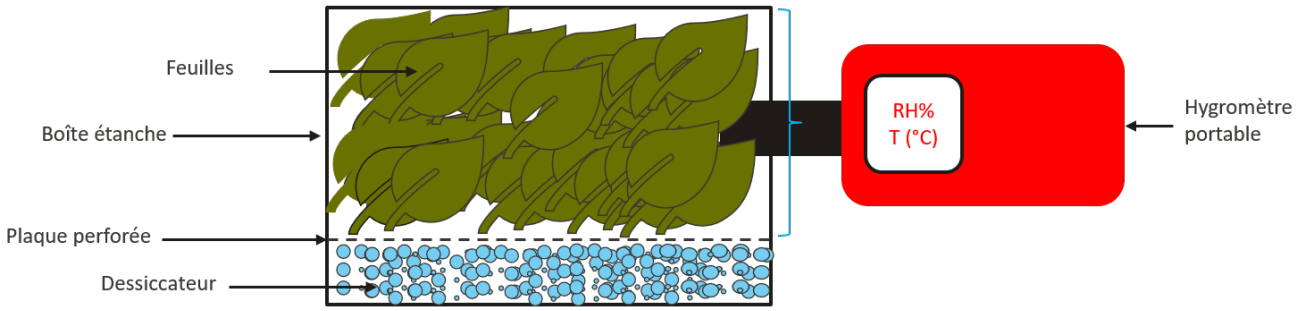


FIGURE II.8 – Illustration du dispositif utilisé pour mesurer l'hygrométrie relative d'un troisième corps externe.

1. Bien que non majoritaire sur le réseau ferroviaire français, ces feuilles sont néanmoins retrouvées sur des zones de pertes d'adhérence importantes. Cette espèce est donc représentative du type de troisième corps externe étant à l'origine de pertes d'adhérences des trains importante.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

II.2.1.3 Choix d'un taux de glissement en lien avec une reprise d'adhérence

Lorsqu'un enrayage ou un patinage survient, la modulation du taux de glissement entre roue et rail (repris en partie I.3.2) permet d'atténuer ces incidents. Pour cela, dans le cas d'un patinage, lors des phases d'accélération (dites de "traction"), le glissement relatif est mesuré en temps réel à partir de la vitesse des roues et d'une vitesse de consigne imposée par le conducteur du train concerné. L'obtention des écarts entre la consigne de glissement imposée par les systèmes de pilotage et la valeur instantanée mesurée permet de fournir une consigne de couple aux moteurs assurant la traction des trains. Une variation du taux de glissement est ensuite appliquée progressivement afin de rechercher un maximum d'adhérence. Ces valeurs maximales dépendent de l'état de surface des rails (et des troisièmes corps associés) ainsi que de la vitesse des trains concernés. Les variations de consignes appliquées au couple moteur doivent être réalisées avec de faibles temps de réponses (de l'ordre de 5 à 10 ms) [5]. Une synthèse des éléments mentionnés dans ce paragraphe est visible sur la figure II.9.

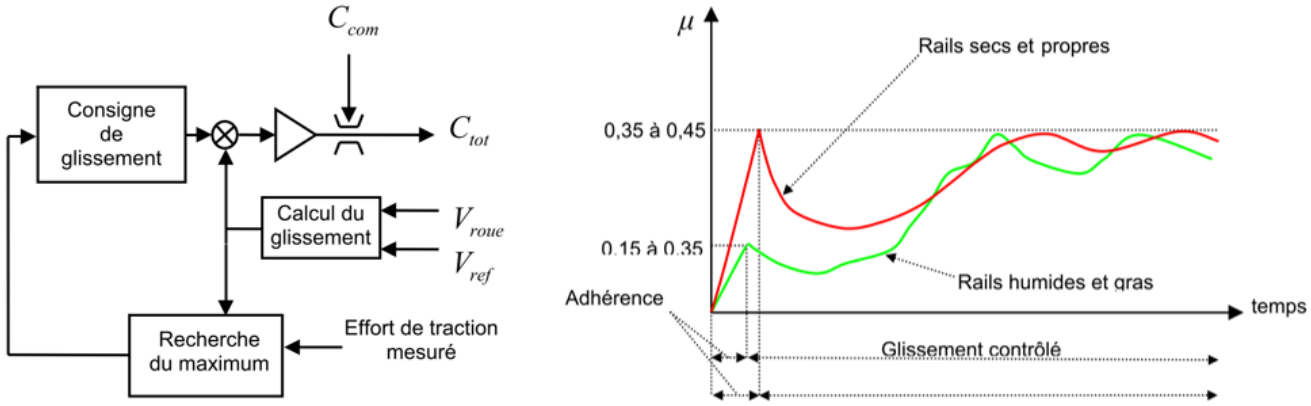


FIGURE II.9 – Principe de fonctionnement d'un dispositif d'anti-patinage à glissement contrôlé [5].

II.2.1.4 Synthèse des paramètres d'études retenus

Les notions décrites au cours des sections I.4.3 et II.2.1.1 permettent donc d'affirmer que trois principaux paramètres influencent l'adhérence d'un contact rail-roue. La présence d'un troisième corps externe de type "feuilles mortes" couplée à des variations d'hygrométrie relative font parties des principales causes à l'origine d'enrayages et de patinages. De plus, le choix de différents taux de glissement entre roue et rail permet de modifier l'impact en termes de sécurité et de régularité que peuvent générer des incidents d'adhérence dégradée.

La majorité des trains en circulation est équipée d'un logiciel contrôlant et modulant les taux de glissement. Ce faisant, les pertes d'adhérence rencontrées sont atténuées. Ils sont qualifiés de

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

logiciels d'anti-patinage et anti-enrayage.
À titre d'exemple, le seuil de glissement en dessous duquel ils sont inactifs est de 2% [116]. Lorsque le glissement mesuré (figure II.9) est supérieur à cette limite, différents algorithmes modifient le pilotage du train en modulant les couples moteurs afin d'obtenir des taux de glissement inférieurs aux limites définies.

Par conséquent, afin d'étudier l'influence du taux de glissement sur l'adhérence du contact rail-roue pollué par des feuilles mortes, la réalisation d'essais reproduisant ces phénomènes est à effectuer. Le choix d'un taux de glissement au contact compris entre 0% et 2.5% (valeur correspondant à un dépassement de 25% des limites existantes sur un système réel) sera donc à prendre en compte.

Les valeurs typiques de ce taux trouvées dans la littérature sont de 0% 0.5%, 1% et 1.5% et 2% [117]. Elles permettent d'appuyer le choix des taux de glissements choisis pour cette étude. L'utilisation d'un taux de glissement égal à 0% est équivalent à une condition de roulement pur. Les taux de glissements appartenant à l'intervalle [0.5% ;2%] permettent de reproduire des conditions d'accélération d'un train sans déclenchement des anti-enrayeurs. Enfin, l'utilisation d'un taux de glissement supérieur à 2% permet de simuler un léger dysfonctionnement des logiciels d'anti-patinage.

Un fonctionnement à fort taux de glissement (>2%) va néanmoins augmenter l'usure des pièces en contact [118] et peut perturber la géométrie et la cinématique des premiers corps sur banc d'essai. Plus généralement, le choix d'un banc d'essai approprié à la compréhension des phénomènes d'adhérence dégradée est nécessaire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

II.2.2 Justification des moyens d'essais et d'analyses

II.2.2.1 Choix du banc d'essai

La reproduction des phénomènes de perte d'adhérence peut être effectuée en utilisant des moyens d'expérimentation de plusieurs types et à différentes échelles [29]. Certains bancs d'essais seront adaptés à des analyses dynamiques à l'échelle de la structure mobile. D'autres sont davantage liés à l'étude du contact rail-roue à une échelle locale (fatigue, usure des corps roulants...).
Le choix du banc d'essai doit ainsi être réalisé en prenant en compte la réalité du contact ferroviaire et les degrés de liberté de l'expérimentateur. La réalité du contact étant définie par des critères donnés par l'utilisateur dépendants du type d'étude à réaliser.

Le choix d'un banc d'essais approprié à l'étude de l'adhérence du contact rail-roue en présence de feuilles doit permettre de reproduire des variations d'adhérence sur des distances cohérentes avec celles liées aux phénomènes réels. Il doit aussi prendre en compte les circuits tribologiques de ce contact et plus particulièrement les mécanismes d'accommodation de vitesses par le troisième corps [29].

Des essais cycliques peuvent être réalisés à l'aide de bancs de type bi-disques. Ces tribomètres sont particulièrement adaptés à la réalisation d'essais de fatigue. Cependant, leur utilisation s'effectue au détriment de la bonne reproduction des circuits tribologiques réels lorsque les rayons des pièces en contact diminuent. Les débits d'éjection, d'usure et de recirculation sont, en comparaison par rapport à un contact réel, exacerbés.

Selon Merino [29], l'utilisation d'un tribomètre de type galet sur rail circulaire permet de conserver les avantages liés à un banc de type bi-disque, tout en réduisant drastiquement les débits d'usure longitudinaux. Les bancs de types galets sur couronne permettent aussi de réaliser des essais continus, non-alternatifs et de prévenir les variations de débits tribologiques associés à des mouvements aller-retour. A contrario, la création de mouvements de spins (effets tangentiels) (mentionnés en section I.2.3.2) sont à prévoir. Ils sont toutefois retrouvés lors de circulations de trains en courbes mais réduits avec l'augmentation des rayons de courbures des pièces en contacts. Une synthèse de l'ensemble des débits tribologiques exacerbés et privilégiés pour différents types de banc est visible sur la figure II.10.

L'utilisation d'un tribomètre de type galet sur couronne peut ainsi permettre d'effectuer et de mener une étude portant sur l'influence de la présence de feuilles mortes à différents taux d'hygrométrie dans un contact dont le taux de glissement peut varier.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

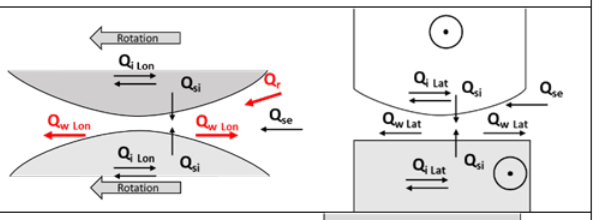
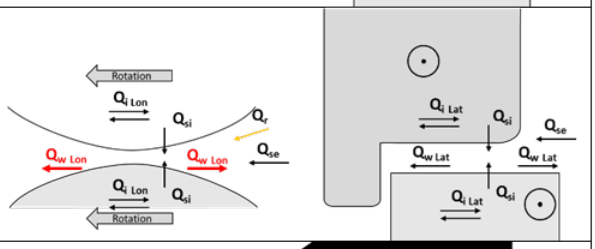
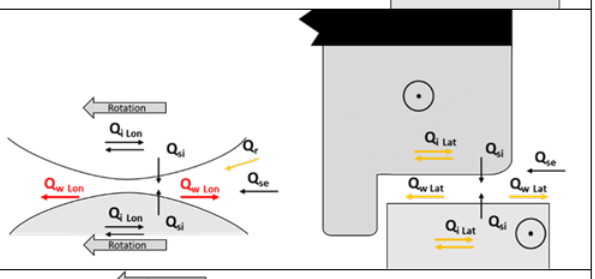
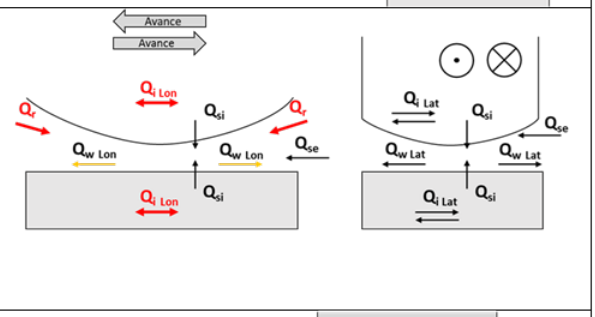
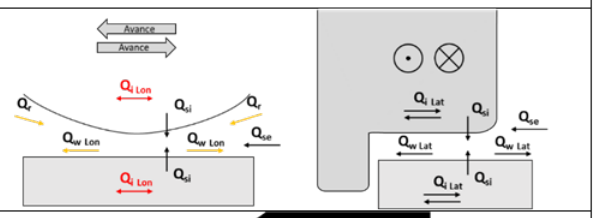
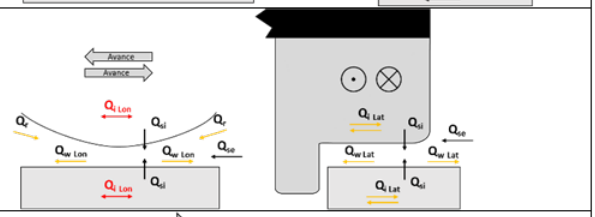
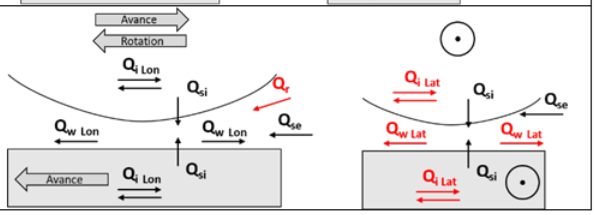
Type de banc d'essai Débit privilégié ou restreint	Circuit tribologique
Bi-disque $Q_{i\,Lon}$ dans une direction privilégiée $Q_{i\ Lat}$ $Q_{w\ Lat}$ existants selon les conditions cinématiques latérales imposées ou non $Q_{w\,Lon}$ exacerbée Q_r variable selon l'usure	
Roue sur rouleau $Q_{i\,Lon}$ dans une direction (sens) privilégiée $Q_{i\ Lat}$ $Q_{w\ Lat}$ existants selon les conditions cinématiques latérales imposées ou non $Q_{w\,Lon}$ peut être exacerbé Q_r modéré	
Essieu (ou bogie) sur rouleau $Q_{i\,Lon}$ dans une direction (sens) privilégiée $Q_{i\ Lat}$ $Q_{w\ Lat}$ existants selon les conditions cinématiques latérales $Q_{w\,Lon}$ peut être exacerbé Q_r modéré	
Galet sur rail linéaire $Q_{i\ Lon}$ $Q_{w\ Lon}$ Q_r sont modifiés dans les deux directions (sens) si banc à mouvement alternatif $Q_{i\ Lon}$ $Q_{w\ Lon}$ dans une direction (sens) privilégiée et Q_r peut être exacerbé si essai unidirectionnel $Q_{i\ Lat}$ $Q_{w\ Lat}$ existants selon les conditions cinématiques latérales imposées ou non	
Roue sur rail $Q_{i\ Lon}$ $Q_{w\ Lon}$ Q_r modifiés dans les deux directions (sens) si banc à mouvement alternatif $Q_{i\ Lat}$ $Q_{w\ Lat}$ existants selon les conditions cinématiques latérales imposées ou non	
Essieu (ou bogie) sur rails $Q_{i\ Lon}$ $Q_{w\ Lon}$ Q_r modifiés dans les deux directions (sens) si banc à mouvement alternatif $Q_{i\ Lat}$ $Q_{w\ Lat}$ existants selon les conditions cinématiques latérales ou non	
Galet sur rail circulaire $Q_{i\,Lon}$ $Q_{w\,Lon}$ dans une direction privilégiée Q_r peut être exacerbé $Q_{i\ Lat}$ $Q_{w\ Lat}$ existants selon les conditions cinématiques latérales imposées ou non	

FIGURE II.10 – Circuits tribologiques associés aux types de bancs d'essais ferroviaires existants et recensés par Merino [29].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

II.2.2.2 Le tribomètre "Triboring"

Description du banc d'essai

Afin de reproduire les conditions de contact réalistes permettant d'obtenir des variations d'adhérence, le banc d'essais Triboring [15], de type galet sur couronne est utilisé. Ce banc est constitué d'un disque de 70 mm de diamètre (représentant une roue), en contact sur une couronne circulaire horizontal de 2 m de diamètre (le rail). Un aperçu du banc est visible sur la figure II.11.

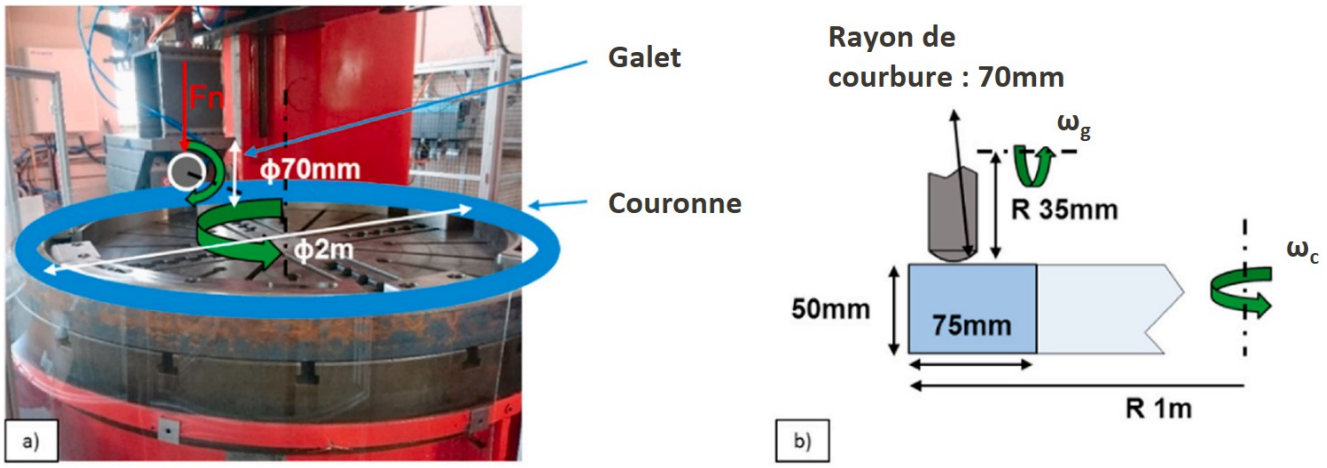


FIGURE II.11 – a) Aperçu du banc d'essai de type galet sur couronne Triboring. b) Schéma du galet en rotation sur un rail circulaire (couronne) [15]

La partie rail est constituée d'une couronne forgée de 2m de diamètre en acier de nuance R260. Elle est composée d'une section rectangulaire de 75 mm x 50 mm. La microstructure et la composition de la partie représentant le rail peuvent être trouvées sur le tableau II.1 [119] . Le processus thermique appliqué lors du forgeage par laminage annulaire conduit à l'obtention d'une microstructure entièrement perlitique similaire à celle des rails de nuance R260 [29](dureté, phases et taille de grain similaires).

La partie roue est composée d'un disque convexe (Ra 0,8 μm) fabriqué à partir de la jante d'une roue de nuance ER7 . Les roues sont usinées de telle sorte que leurs caractéristiques microstructurales et mécaniques soient similaires à celles d'une vraie roue (mentionnées en section I.2.1). La roue fabriquée est ensuite pilotée en glissement, ses dimensions sont visibles sur la figure II.12. Le pilotage en glissement s'effectue avec des temps de réaction du système similaire à ceux mentionnés en partie II.2.1.3 à partir de mesures des différences de vitesses entre les premiers corps en contact.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Composition chimique (pourcentage massique %)												
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Cu	Mo	Ni	V	Cr+Mo+Ni
Acier R260	0.62-0.8	0.15-0.58	0.7-1.20	⩽0.025	⩽0.025	⩽0.15	⩽0.004					
Acier ER7	0.52	0.40	0.80	0.020	0.020	0.30		0.30	0.08	0.30	0.06	0.50

Tableau II.1 – Composition chimique d'un acier de nuance R260 [119], et d'un acier de nuance ER7 [13], pourcentage massique.

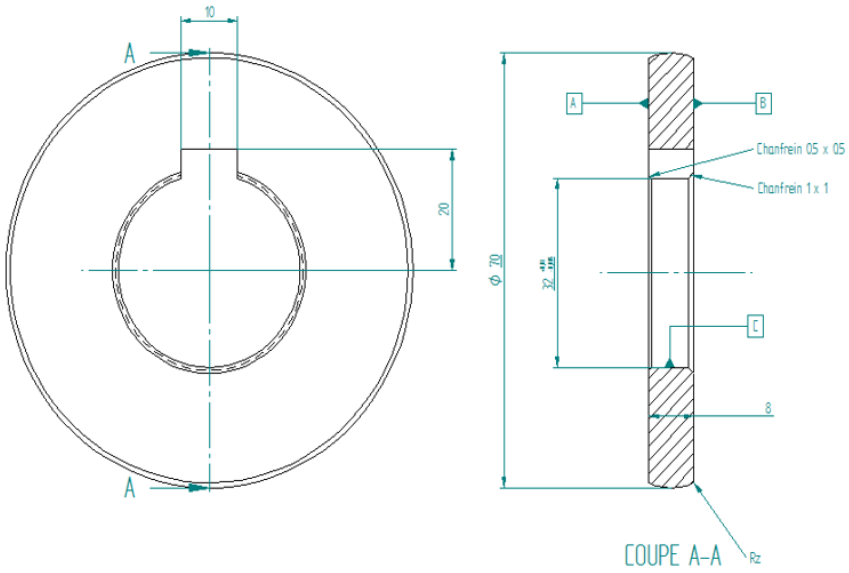


Figure II.12 – Plan des galets utilisés sur le tribomètre Triboring.

Les vitesses de rotation de la couronne et du galet sont mesurées à l'aide de deux codeurs incrémentaux de déplacement (8192 divisions pour le galet, 3600 divisions pour la couronne). La mesure des forces normales et tangentielles près du contact est effectuée à l'aide de quatre capteurs de forces triaxiaux à jauges de déformations spécialement conçues pour le banc Triboring.

Chaque voie est utilisée pour la mesure des forces avec une gamme de ±3kN pour la force normale et transversale et ±1kN pour la force longitudinale. Le couple moteur est régulé grâce à la vitesse angulaire mesurée sur l'arbre du moteur.

La mesure des vitesses de rotation du galet et de la couronne permet d'imposer un taux de glissement au sein du contact avec une précision inférieure à 0.05% [29].

De plus, une caméra (spectre visible, résolution : 1920 x 1080, luminosité constante) permet de filmer la surface des pièces en contact et l'évolution de la morphologie des troisièmes corps formés pendant la réalisation d'un essai.

Les essais d'adhérence sont réalisés dans des conditions représentatives de la réalité ferroviaire

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

(tableau II.2).

Associées à ces conditions, les dimensions théoriques du contact de Hertz (demi-largeur et longueur) sont de 0,55 mm (direction longitudinale) et 0,86 mm (direction transversale). La vitesse de rotation de l'anneau est fixée à 13,5 tr/min (équivalent à une vitesse linéaire de 1,3 $m.s^{-1}$), la pression hertzienne théorique est de 1 GPa, (équivalent à une force normale de 1 kN dans la configuration actuelle).

Conditions d'essais standards	
Nuance d'acier couronne	R260
Nuance d'acier galet	ER7
Rayon du galet	35+/-0.1 mm
Rayon de courbure des galets	70+/-0.1 mm
Vitesse linéaire de la couronne	1.3 $m.s^{-1}$
Pression de Hertz théorique	1 GPa
Force normale imposée	1 kN
Fréquence d'acquisition	2000 Hz
Vitesse angulaire du galet ω_g	41.3 $rad.s^{-1}$
Vitesse angulaire de la couronne ω_c	1.4 $rad.s^{-1}$

TABLEAU II.2 – Conditions d'essais courantes appliquées sur l'ensemble des campagnes réalisées.

Pilotage en glissement du banc Triboring

Le banc d'essai Triboring est piloté en glissement. Cette grandeur permet de définir un coefficient de proportionnalité entre les vitesses linéaires du galet et de la couronne. Le taux de glissement appliqué sur le banc d'essai est calculé à l'aide de l'équation II.1 :

$$\gamma = \frac{V_g - V_c}{(V_g + V_c)} = \frac{R_g\omega_g - R_c\omega_c}{R_g\omega_g + R_c\omega_c} \tag{II.1}$$

Avec V_c et V_g correspondant aux vitesses linéaires de la couronne et du galet au niveau de la zone de contact. ω_g et ω_c définissent les vitesses angulaires du galet et de la couronne. R_g correspond au rayon du galet et R_c à la distance entre le centre de la zone de contact et le centre de la couronne.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Essais réalisés

L'asservissement du taux de glissement du contact entre les premiers corps sur le banc Triboring associé au contrôle de l'hygrométrie relative initiale des troisièmes corps externes permet de définir une liste de conditions d'essais faisant l'objet d'une étude paramétrique au chapitre IV. Cette liste, visible sur le tableau II.3 reprend les variations des différents facteurs retenus pour cette étude.

Liste des conditions d'essais			
	Hygrométrie relative des troisièmes corps		
Taux de glissement	[30 ;35%]	[45 ; 55%]	$\leqslant$ 85%
0%	x	x	x
0.5%	x	x	x
1%	x	x	x
1.5%	x	x	x
2%	x	x	x
2.5%	x	x	x

Tableau II.3 – Liste des conditions d'essais appliquées sur le tribomètre Triboring.

Les paramètres retenus dans l'étude des variations d'adhérence du contact rail–roue sont maintenant associés à un banc d'essai. Ce dernier permettant de reproduire des circuits tribologiques réalistes.

II.2.3 Méthodes et outils d'analyse

Démarche

L'étude des problématiques d'adhérence dégradées du contact rail–roue doit donc s'effectuer en prenant en compte des aspects mécaniques et physico-chimiques (cf section I.4.2). Les éléments associés à la démarche d'analyse pour un essai réalisé avec le banc Triboring sont détaillés ci-après.

II.2.3.0.a Analyse mécanique de la problématique

La reproduction d'un contact rail-roue sur un tribomètre quelconque permet de réaliser des mesures d'efforts et de vitesses, au plus près des contacts étudiés. Dans le cas de l'utilisation du banc Triboring, les variations d'efforts normaux et tangentiels sont mesurées pour un taux de

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

glissement initial imposé et cinématiquement maintenu. Ces données permettent d'expliciter un **facteur de frottement** noté μ du contact (équation II.2) :

$$\mu = F_t/F_n \tag{II.2}$$

Avec F_t et F_n correspondants respectivement aux efforts tangentiels et normaux mesurés au contact.

Les variations d'adhérence d'un contact rail-roue sont reliées aux variations du facteur de frottement défini dans cette partie. Ce facteur permet de prendre en compte de façon couplée les modifications d'efforts tangents et normaux associées à l'ajout d'un troisième corps externe au contact.

La mesure des vitesses linéaires de glissement des premiers corps permet aussi de définir deux grandeurs énergétiques. Elles correspondent respectivement à l'énergie dissipée par frottement (noté E_f, équation II.3) et à la puissance dissipée par frottement au contact (noté P_f, équation II.4) :

$$E_f = \sum_{i=1}^{N} |F_t * (V_g - V_c)| * \Delta_i = \sum_{i=1}^{N} |F_t * (R_g\omega_g - R_c\omega_c)| * \Delta_i \tag{II.3}$$

$$P_f = |F_t * (V_g - V_c)| = |F_t * (R_g\omega_g - R_c\omega_c)| \tag{II.4}$$

Avec :
- N : Nombre de point de mesure.
- F_t : Effort tangentiel au contact (N).
- F_n : Effort normal au contact (N).
- V_g : Vitesse linéaire du galet ($m.s^{-1}$)
- V_c : Vitesse linéaire de la couronne, à rayon donné ($m.s^{-1}$)
- R_g : Rayon du galet (m).
- R_c : Rayon de la couronne (m).
- ω_g : Vitesse angulaire du galet ($rad.s^{-1}$).
- ω_c : Vitesse angulaire de la couronne ($rad.s^{-1}$).
- Δ_i : période d'échantillonnage, inverse de la fréquence d'acquisition (s).

À l'exception des efforts normaux et tangentiels, les données mentionnées ci-dessus sont spécifiées sur le tableau II.2.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

D'un point de vue énergétique, les variations du facteur de frottement se traduisent par une modulation des dissipations d'énergie et de puissance par le contact. Ces grandeurs sont liées aux changements des propriétés mécaniques et physico-chimiques du troisième corps formé dans le contact.

D'un point de vue tribologique, la puissance et l'énergie dissipées par frottement permettent d'identifier les conditions nécessaires visant à maximiser la capacité des troisièmes corps à transmettre une énergie mécanique aux deux premiers. Cette idée permet de définir la notion de mobilisation d'énergie mécanique transmissible par un troisième corps aux premiers.

Associée à l'étude de l'adhérence du contact rail–roue, cette mobilisation énergétique se traduit par la capacité d'un troisième corps à solliciter l'adhérence d'un train au travers d'une transmission d'énergie mécanique entre roue et rail. Elle est dans notre cas reliée aux conditions d'essais imposées sur Triboring. L'application de différents taux de glissement et hygrométries relatives modifiant les quantités d'énergies dissipables par frottement.
Ces grandeurs dépendent de la vitesse de glissement ; l'augmentation du taux de glissement va naturellement être à l'origine d'une hausse d'énergie transmissible par le troisième corps jusqu'à une limite. Ainsi, corréler l'énergie (ou la puissance) dissipée par frottement et le facteur de frottement peut permettre d'identifier un seuil au-delà duquel le troisième corps ne pourra plus être mobilisé pour faciliter la transmission d'énergie d'un corps en mouvement au corps fixe. Ces notions sont reprises sur la figure II.13. On notera par ailleurs qu'une partie de l'énergie initialement introduite par le mouvement est dissipée sous forme d'énergie thermique.

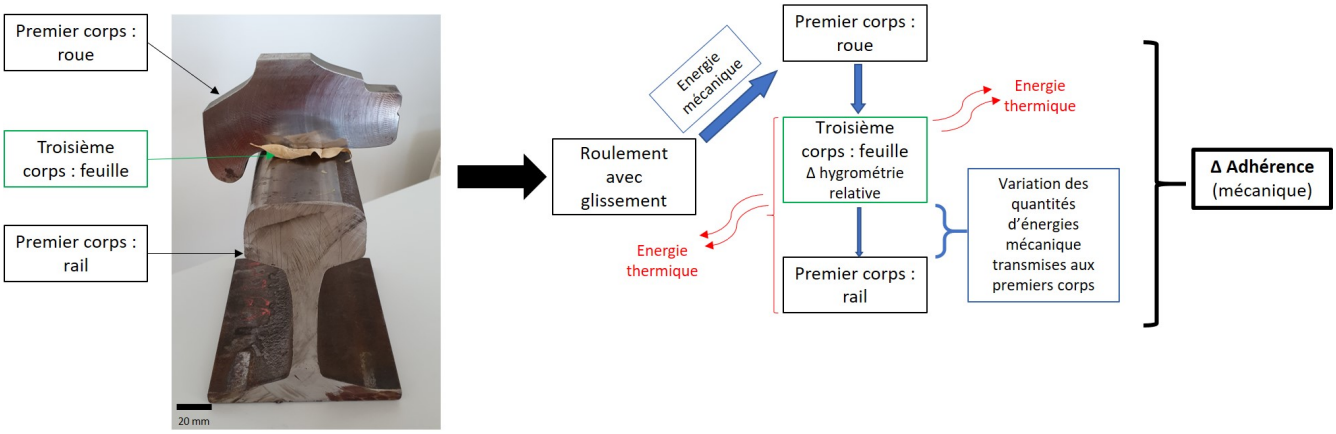


FIGURE II.13 – Schéma de principe associé aux variations énergétiques d'adhérence d'un contact rail-roue en présence d'un troisième corps organique sur la surface d'un rail.

Les grandeurs mécaniques définies dans cette section permettent donc de quantifier d'un point de vue global l'évolution de l'adhérence d'un contact rail-roue. Ces données sont néanmoins à coupler avec l'utilisation de moyens d'observations explicitant la description de la morphologie des troisièmes corps observés pour différentes conditions d'essais.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

II.2.3.0.b Moyens d'observations

La surface des pièces en contact sur le banc Triboring font l'objet de différentes observations optiques en lumière visible. Au cours d'un essai arrêté, un microscope numérique portable (AM73515MZTL, résolution : 5 MP (2560x1920), grossissement : x10-x140) permet de prendre directement sur banc d'essai des photos de la surface des premiers corps avec une résolution micrométrique. L'utilisation de cet outil a pour avantage de ne pas modifier la morphologie des troisièmes corps du fait de l'absence de prélèvement.

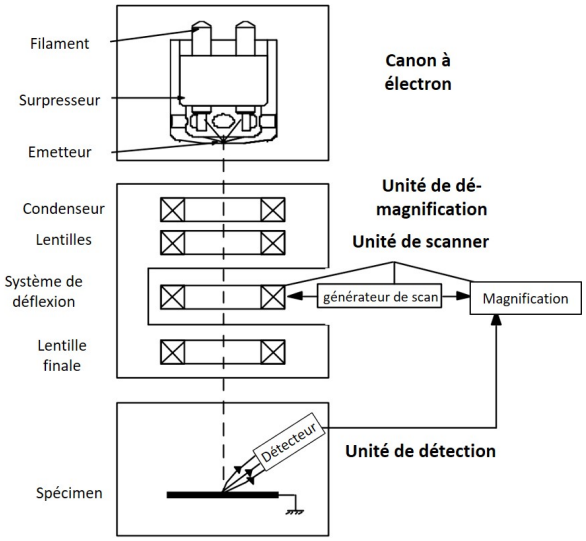
Des prélèvements peuvent néanmoins être réalisés lors d'essais arrêtés sur Triboring. Pour cela, l'utilisation de scalpel permet de récolter un troisième corps de la surface des premiers corps de façon localisée (sur une zone d'environ 1 à 5 mm^2). Cependant, l'utilisation de ce type d'outil peut modifier la structure des échantillons à étudier.

Les prélèvements réalisés font ensuite l'objet d'observations à l'aide d'un microscope numérique permettant de produire des images d'échelles millimétriques à micrométriques (Keyence VHX-2000F, lumière visible, résolution 1080x720, grossissement : x20-x1000). L'utilisation d'un microscope numérique photonique permet d'observer la structure et la morphologie des surfaces des troisièmes corps prélevés ou de l'un des premiers corps (ici, les galets en acier de nuance ER7).

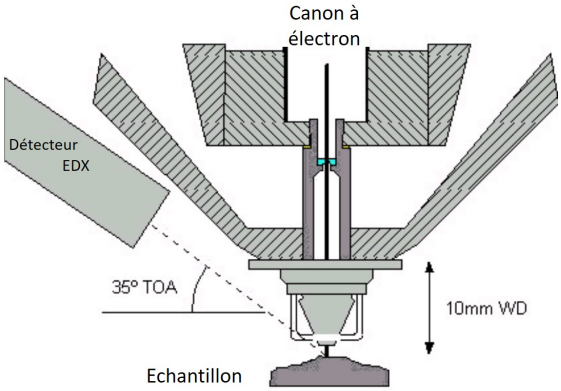
Ces échantillons peuvent faire l'objet d'observations complémentaires par Microscopie Electronique à Balayage (MEB). Le microscope électronique à balayage FEI Quanta 600 (figure II.14), dont le pouvoir de résolution est supérieur et permet d'accéder à la composition de la surface des corps observés, est principalement utilisé pour la réalisation d'observations d'éléments organiques (feuilles mortes). Un mode vide partiel avec pression contrôlée afin de minimiser la vaporisation de l'eau des échantillons (100Pa) et des tensions d'accélération comprises entre 15 et 20kV sont utilisées. Elles permettent de générer des électrons secondaires, rétrodiffusés, Auger ainsi que des rayons X.
Ces observations sont réalisées à l'aide de détecteurs d'électrons secondaires (résolution : 3.0nm à 3kV) et d'électrons rétrodiffusés (résolution 2.5nm à 30kV). Le détecteur d'électrons secondaires permet de visualiser la topographie des échantillons observés, et de quantifier l'activation des débits de matières internes. Le détecteur d'électrons rétrodiffusés permet quant à lui de mettre en évidence une différence d'éléments chimiques basée sur leurs numéros atomiques (contraste de phase). L'utilisation de ce détecteur est généralement couplée à des outils d'analyses spectrométriques.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

(a)



(b)



(c)

FIGURE II.14 – a) Photographie du microscope électronique à balayage utilisé b) Principe de fonctionnement [120] c) Bombardement d'une cible par un faisceau d'électron primaire d'énergie E_0 induisant une libération d'électron secondaire d'énergie E et de photon X d'énergie $h\nu$ [39].

II.2.3.0.c Moyens d'analyses physico-chimiques

L'observation de la morphologie et de la topographie d'échantillons de troisièmes corps au travers de l'utilisation de microscopes photonique et électronique sert à mettre en évidence l'influence des modifications des conditions d'essais, et ce d'un point de vue mésoscopique. Les modifications physico-chimiques survenues au sein des troisièmes corps peuvent en revanche être mises en évidence à l'aide d'outils spectrométriques. Les prélèvements issus des essais réalisés sur le banc Triboring visant à reproduire des pertes d'adhérence en présence de feuilles mortes sont analysés par spectrométrie EDX (Energy-Dispersive X-ray spectroscopy) et infrarouge (IR).

La **spectroscopie EDX** est utilisée pour déterminer la composition élémentaire d'un échan-

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

tillon. Cette technique d'analyse est basée sur l'utilisation des rayons X émis par les atomes excités par un flux élctronique. Ces derniers permettent de réaliser une analyse constitutive "atomique" des surfaces observées.

Un échantillon est excité par une source d'énergie et dissipe une partie de l'énergie absorbée en éjectant un électron de sa couche centrale. Un électron d'enveloppe externe plus énergétique prend alors sa place, libérant la différence d'énergie sous forme de rayons X dont le spectre est caractéristique de l'atome d'origine. Cela permet de réaliser une analyse de la composition de la surface d'un échantillon excité par une source d'énergie (figure II.15). La position des raies, mesurée en eV, dans un spectre identifie l'élément. La figure II.16 recense les raies principales sur lesquelles se base la détection des éléments détectables en fonction des matériaux analysés (organiques et inorganiques) au cours de cette étude. Ces analyses sont aussi complétées par l'utilisation d'un outil spectroscopique infrarouge.

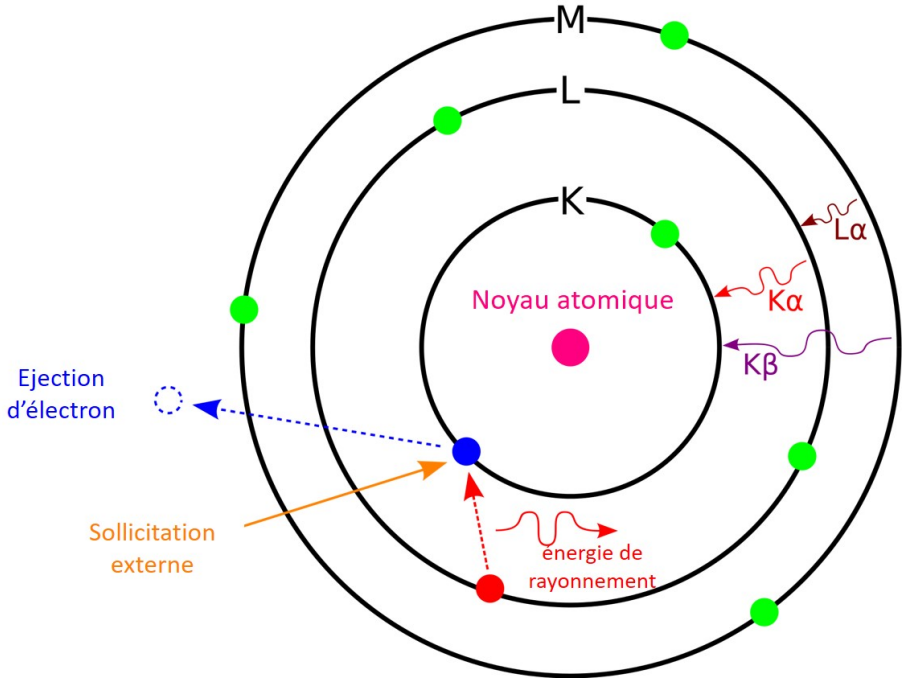


FIGURE II.15 – Schéma de principe de spectroscopie EDX.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Eléments	Raies (KeV)	
	Kα	**Lα**
C	0,2774	
N	0,3924	
O	0,5249	
Si	1,7398	
P	2,0134	
S	2,3075	
Ti	4,5089	0,4522
Cr	5,4117	0,5729
Mn	5,8951	0,5729
Fe	6,3996	0,7048

FIGURE II.16 – Raies principales de détection des éléments composants les matériaux étudiés. Kα est la raie principale du premier niveau d'énergie, Lα est la raie principale du second niveau d'énergie (image issue de [39]).

La **spectroscopie infrarouge** (spectroscopie IR, illustré en figure II.17) correspond à la mesure de l'interaction du rayonnement infrarouge avec la matière par absorption, émission ou réflexion. Elle est utilisée pour étudier et identifier des substances chimiques ou des groupes fonctionnels sous forme solide, liquide ou gazeuse. Elle peut aussi servir à caractériser de nouveaux matériaux ou identifier et vérifier des échantillons connus et inconnus.

La méthode ou technique de spectroscopie infrarouge est réalisée à l'aide d'un instrument appelé spectromètre infrarouge (ou spectrophotomètre) qui produit un spectre infrarouge. Le spectre infrarouge d'un échantillon est établi grâce à la réflexion d'un faisceau de lumière infrarouge sur leur surface. L'examen de la lumière transmise indique la quantité d'énergie absorbée à chaque longueur d'onde (ou nombre d'onde). Cette technique fonctionne quasiment exclusivement sur les échantillons présentant des liaisons covalentes et est ainsi particulièrement adaptée à l'étude de troisièmes corps de type organiques.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

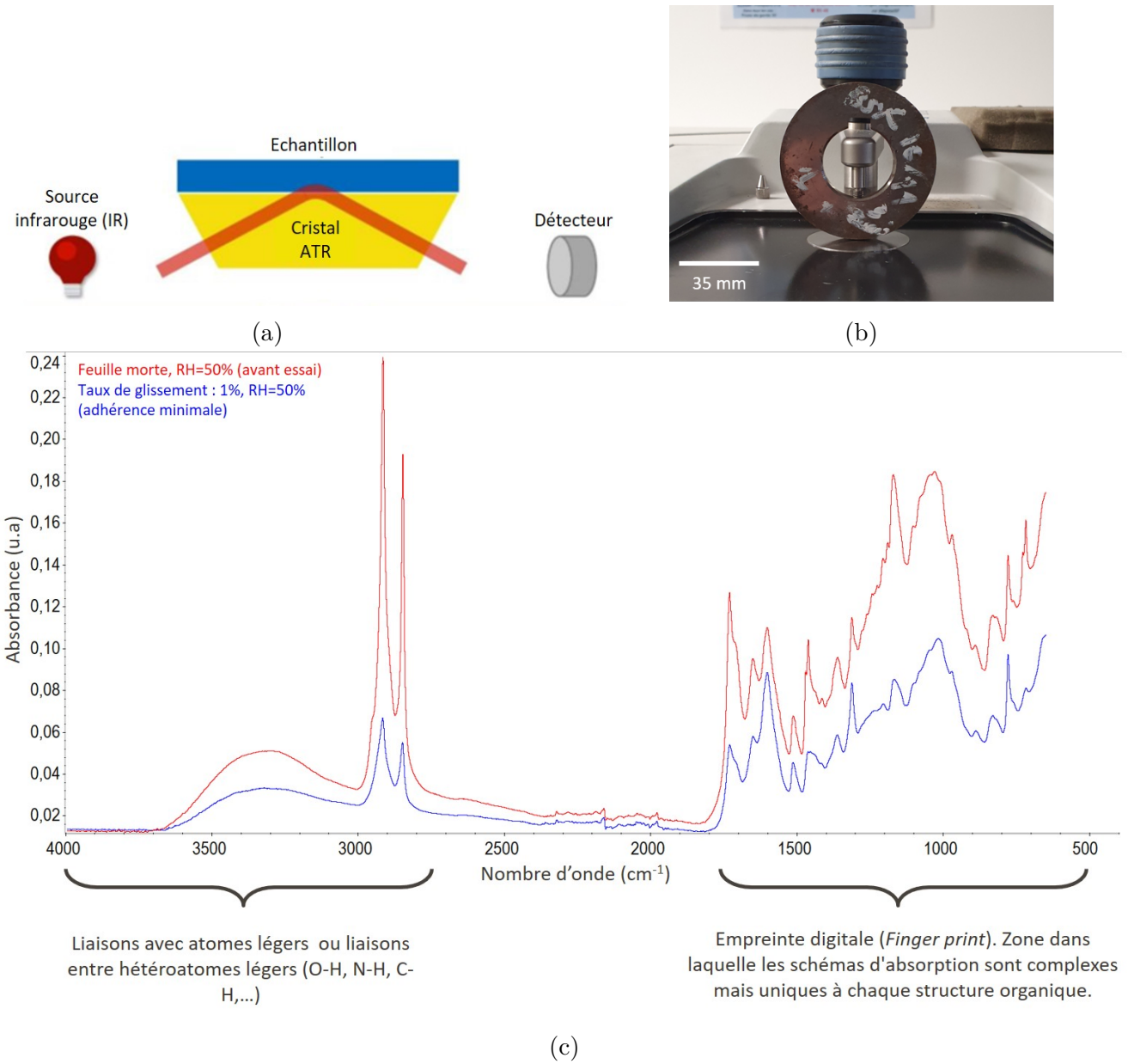


FIGURE II.17 – a) Principe de fonctionnement d'une analyse spectroscopique par infrarouge b) Environnement de mesure associés aux analyses IR c) Exemple de données obtenues après analyses infrarouge en absorption de deux troisièmes corps prélevés après essais sur le banc Triboring.

Un spectre infrarouge peut être visualisé sur un graphique donnant l'absorbance (ou la transmittance) de la lumière infrarouge sur l'axe vertical en fonction de la fréquence ou de la longueur d'onde sur l'axe horizontal. La partie infrarouge du spectre électromagnétique est généralement divisée en trois régions : l'infrarouge proche, moyen et lointain, nommées en fonction de leur relation avec le spectre visible. Le proche infrarouge à haute énergie, environ 14000-4000 cm^{-1}, peut exciter des modes harmoniques ou combinés de vibrations moléculaires. L'infrarouge moyen, environ 4000-400 cm^{-1} est généralement utilisé pour étudier les vibrations fondamentales et la structure

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

rotationnelle et vibrationnelle d'une molécule. L'infrarouge lointain, environ 400-10 cm^{-1} a une faible énergie et peut être utilisé pour identifier des groupements générant des vibrations à basse fréquence. Dans le cadre de ces travaux de thèse, le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (IR-TF) Nicolet iS10 est utilisé en mode réflectance totale atténuée. Ce mode permet d'obtenir des spectres IR avec très peu de modifications associées à la préparation des échantillons analysés. Lorsque plusieurs spectres sont étudiés de façon simultanée, une normalisation des signaux par rapport au pic dont l'intensité est le plus important est effectuée.

Cette technique d'analyse physico-chimique réclame une connaissance des spectres infrarouges des macromolécules (polymères) constituants les troisièmes corps étudiés. Les éléments bibliographiques définis en partie I.4.2.3 permettent de décrire les structures des principaux polymères constituants une feuille (hémicelluloses, cellulose, et lignine, figure I.56). Ces dernières peuvent être approfondis au travers de l'acquisition de leurs spectres infrarouges.

II.2.3.0.d Données infrarouges de référence associées aux constituants d'une feuille

La figure II.18 permet de décrire les nombres d'ondes des différentes bandes d'absorptions IR associées aux groupements d'une molécule de cellulose [121].

from	to	info
3125	3575	m; O-H stretching vibration, broad
1725	1750	s;C=O stretching vibration (after oxidation)
1600	1635	m; O-H deformation vibration
1435	1480	w; CH_2 deformation vibration
1375	1375	w; C-H deformation vibration
1340	1340	w; O-H deformation vibration
1030	1320	w; various bands
830	830	w; CH_2 deformation vibration

FIGURE II.18 – Bandes d'absorption IR d'une molécule de cellulose [121]. L'intensité des bandes d'absorption est visible sur la colonne "info" : 's' correspond à une forte intensité ; 'm' : une intensité moyenne ; 'w' : une intensité faible ; 'v' : une intensité variable.

Les macromolécules de lignine sont composées de nombreuses liaisons carbone-carbone simples et doubles et peuvent être trouvées sous trois principales formes (partie I.4.2.3). Il n'existe donc pas de molécule de lignine unique à proprement parler et donc de spectre IR de référence. Toutefois, les lignines sont principalement composées de groupes phénoliques C_6H_6O. La figure II.19 permet d'identifier les nombres d'ondes des principales bandes IR associées à un groupement phénol présent dans une molécule de lignine.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

from	to	info
1310	1410	s; combination of O-H deformation vibration and C-O stretching vibration
1180	1260	s; C-O stretching vibration
1660	1660	s; usually a doublet, C=C stretching vibration
1110	1110	v; C-H deformation
600	720	s; O-H out-of-plane bending, often broad
375	450	w; aromatic C-OH in-plane bending vibration

FIGURE II.19 – Bandes d'absorption IR associées à un groupement phénol présent dans une molécule de lignine [121]. L'intensité des bandes d'absorption est visible sur la colonne "info" : 's' correspond à une forte intensité ; 'm' : une intensité moyenne ; 'w' : une intensité faible ; 'v' : une intensité variable.

Récemment, les études physico-chimiques réalisées par Ishizaka [105] et Bringel [54] sur des troisièmes corps formés à la suite d'une perte d'adhérence révèlent la présence de composés organiques.

Ces auteurs ont pu mener des analyses basées sur des techniques de spectroscopies EDX, infrarouge, Raman, diffraction par rayons-X et fluorescence des rayons-X [2]. Ils ont pu mettre en évidence des réactions entre des ions ferreux issus des biomasses et d'autres éléments issus de l'environnement des troisièmes corps.

Ces réactions font intervenir des ions de type oxalate ($C_2O_4^{2-}$) dont les principales bandes d'absorption par infrarouge sont visibles sur la figure II.20

from	to	info
1680	1730	s; C=O stretching vibration
1400	1490	C-O and C-C
1260	1300	C-O and O-C=O
800	900	
520	600	
415	500	ring and O-C=O deformation vibration
365	365	O-C=O deformation vibration

FIGURE II.20 – Bandes d'absorption IR associées à un ion oxalate ($C_2O_4^{2-}$) [121]. L'intensité des bandes d'absorption est visible sur la colonne "info" : 's' correspond à une forte intensité ; 'm' : une intensité moyenne ; 'w' : une intensité faible ; 'v' : une intensité variable.

2. La spectroscopie infrarouge est basée sur des processus d'absorption de la lumière et permet d'étudier les modifications des moments bipolaires associées à des liaisons chimiques. La spectroscopie Raman est basée sur un processus de diffusion de la lumière et permet de surveiller les procédés de cristallisation et de révéler les mécanismes et la cinétique d'une réaction. La fluorescence des rayons X est utilisée pour réaliser des analyses chimiques globales des éléments d'un échantillon et permet surtout de déterminer leurs concentrations. La diffraction par rayons-X sert à caractériser des phases cristallines de manière qualitative et semi-quantitative. Dans le cadre de ces travaux de thèse, seules les techniques de spectroscopies EDX, et Infrarouge ont été disponibles.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

L'étude de l'influence des changements d'hygrométrie relative des troisièmes corps est l'un des paramètres principaux à considérer lors de la reproduction des phénomènes de pertes d'adhérence sur le banc d'essai Triboring.

D'un point de vue physico-chimique, la modification de l'hygrométrie relative d'une feuille se traduit par l'apparition et par variations d'intensité de bandes d'absorptions infrarouge d'une molécule de cellulose. Cichosz [122] a pu montrer que l'augmentation de l'hygrométrie relative d'un environnement modifie les bandes d'absorptions liées aux liaisons hydrogène-oxygène présentes dans cette molécule (figure II.21).
Selon cet auteur, l'augmentation de la teneur en humidité des fibres de cellulose modifie à un niveau moléculaire les distances associées aux liaisons hydrogènes inter et intramoléculaires. Ces changements influent sur la cristallinité de ce polymère ainsi que le transfert de contraintes subies par les fibres de cellulose et décrites dans la littérature [123].

Des modifications physico-chimiques survenues au sein de la molécule de cellulose peuvent donc influencer le comportement mécanique d'une feuille morte dont l'hygrométrie varie.

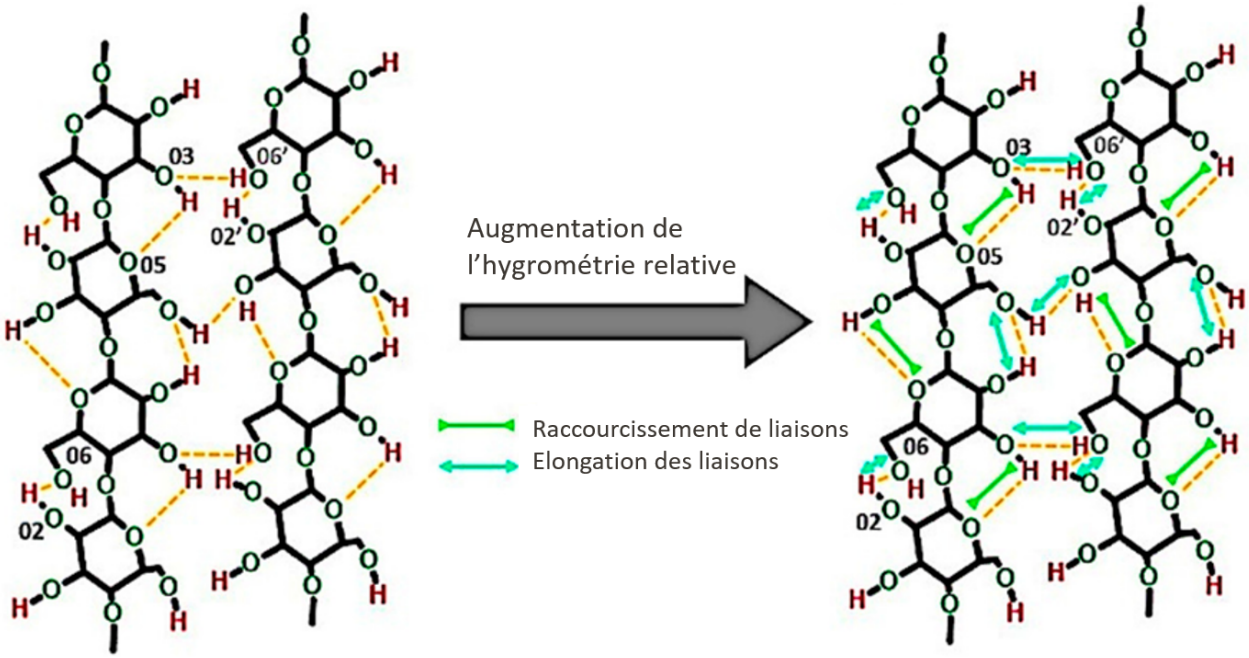


FIGURE II.21 – Modification de la taille des liaisons hydrogènes inter et intramoléculaires présentes dans une molécule de cellulose et associées à une augmentation de l'hygrométrie relative. Figure issue de [122].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

II.2.3.0.e Validité des analyses réalisées

Les éléments mentionnés sur la section II.2.2 ont permis de mettre en évidence l'influence de phénomènes ayant une origine issue d'un couplage mécanique (au travers des variations des taux de glissements et des facteurs de frottement) et physico-chimiques (au travers de modifications associées aux liaisons moléculaires des polymères constituants le troisième corps externe étudié).

L'utilisation de moyens d'analyses et d'observations (section précédente) est conditionnée par celle de moyens d'essais reproduisant les différents circuits tribologiques du contact étudié.

À titre de rappel, les travaux réalisés par Ishizaka et Lewis [105] ont été menés à partir du broyage sous forme de poudre de feuilles mortes. Ceux réalisés par Bringel [54] l'ont été à partir de l'utilisation de broyeurs à anneau permettant de conserver la structure d'une feuille morte mais ne reproduisant pas le caractère roulant d'un contact rail-roue.
Dans ces deux cas la structure de ces troisièmes corps est dégradée ou le contact reproduit sur banc d'essai n'est pas représentatif d'un point de vue tribologique d'un contact rail-roue réel. Ces deux aspects peuvent être corrigé à partir de la réalisation d'essais d'adhérence sur le banc Triboring.

En effet, la géométrie des premiers corps présents sur ce banc permet d'obtenir une reproduction d'un contact rail-roue réel à une échelle réduite (1/15). L'ajout de feuilles mortes dont la structure mécanique n'a pas été modifiée est aussi possible. Enfin, le pilotage en glissement imposé et contrôlé du banc d'essai contribue à la reproduction des phénomènes d'adhérence dégradée ainsi qu'au fonctionnement des logiciels d'anti-patinage (figure II.9).

La figure II.22 reprend la démarche d'étude appliquée à la réalisation d'essais de reproduction de pertes d'adhérence sur le banc Triboring.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

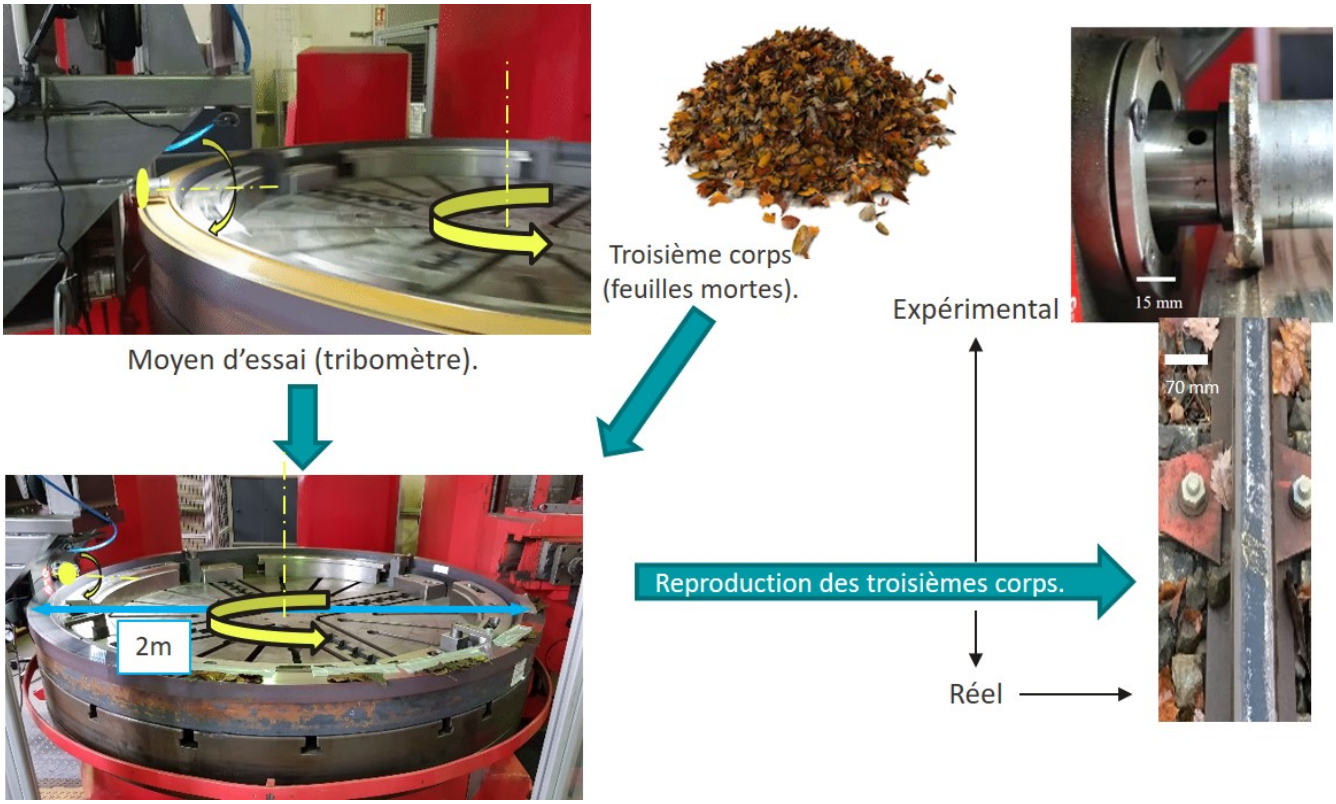


FIGURE II.22 – Principe d'utilisation du banc d'essai Triboring en lien avec la réalisation d'essais de reproduction de pertes d'adhérence causées par la présence de feuilles mortes.

Les éléments bibliographiques associés aux problématiques de pertes d'adhérence des trains sont présentés en partie I.4.2. La présence d'un troisième corps externe de type "feuilles mortes humides" a été identifié comme étant à l'origine de plus de la moitié des incidents d'enrayages et de patinage sur le réseau ferroviaire français. Ces résultats sont appuyés par différents auteurs (partie I.4.2.1) et ont servi à mettre en évidence la présence d'un couplage liant variations d'adhérence d'un point de vue mécanique et physico-chimique.

La reproduction des pertes d'adhérence sur banc d'essai peut ainsi être réalisée en utilisant un tribomètre s'approchant au plus près des circuits tribologiques d'un contact rail-roue réel. Ces essais sont notamment appuyés par différents retours d'expériences industriels permettant de confirmer l'obtention d'une structure de troisième corps réaliste. Ces éléments sont basés sur l'étude de deux cas concrets présentés ci-après.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

II.3 Etude préléminaire : obtention d'éléments de références portant sur l'analyse morphologique et physico-chimique de troisièmes corps réels

II.3.0.1 Cas d'étude n°1 : pertes d'adhérence sur une ligne montagneuse

Des travaux de recherches portant sur des phénomènes d'adhérence dégradés faisant suite à la présence de pollutions végétales ont été menés par l'organisme RTRI au Japon. Parmi ces derniers, Chen et al, [124] mettent en place une procédure d'essais à l'échelle 1 (avec un train composé de deux wagons) sur ces sujets.

Ces auteurs parviennent sur une zone de 20m à reproduire qualitativement un troisième corps végétal responsable de perte d'adhérence sur une ligne de montagne. Pour cela, ils déposent des feuilles sur la table de roulement du rail allant être écrasées par un passage de train en phase d'accélération ou de freinage. Ainsi, ils démontrent que la présence d'humidité est nécessaire pour la génération d'une faible adhérence. La pollution déposée sur la surface des rails est transportée par les roues d'un train sur des distances pouvant aller jusqu'à la centaine de mètres.

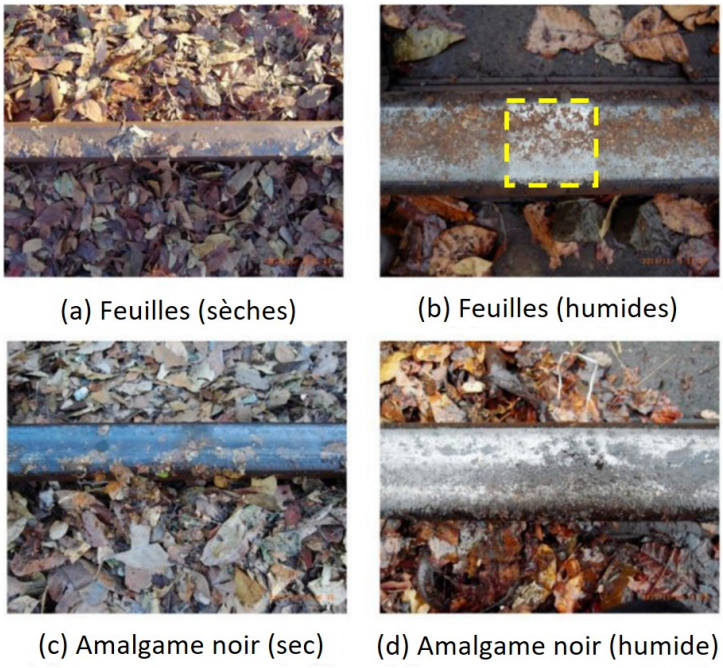


FIGURE II.23 – États de surface de rail photographiés par Chen [124] après ajout de feuilles mortes sur la surface d'un rail pour différents cas d'hygrométrie. L'encart sur la photographie b) met en évidence un transfert de pollution organique d'une zone à une autre initialement nettoyée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Sur la photographie (b) de la figure II.23, une zone meulée entourée en jaune met en évidence la présence de débits d'éjection et de recirculation de matière. La pollution est transmise de la surface de la roue à la surface du rail. Une fois sec, ce troisième corps génère une couche noirâtre adhésive au rail et diminuant l'adhérence disponible.
La réalisation de ces essais permet de prouver l'une des hypothèses proposées par Ishizaka [56] et vérifiée par Bringel [54] liée à la nécessité de la présence d'eau dans un contact pollué par de la végétation.

Les mécanismes d'adhésion de ce $3^{ème}$ corps noirâtre ne sont pas explicités par Chen *et al.* [124] durant la phase d'essais utilisant un train (échelle 1). En revanche, ces auteurs confirment l'idée selon laquelle ce troisième corps n'est adhésif que lorsqu'il est sec. Ainsi, les conditions d'adhérence tant en traction qu'en freinage en présence d'une faible pluie (bruine) ou d'un brouillard d'eau sont plus faibles qu'en présence d'une forte pluie ou d'un temps sec.

Ceci s'explique par une présence d'eau importante permettant de rendre cette pollution moins adhésive au rail. En effet, dans ces conditions, cette dernière se transforme en une pâte pouvant être évacuée de la surface du champignon d'un rail par un nettoyage mécanique. La couleur "noire" de ce troisième corps est justifiée par une réaction associée à la dégradation des cellules ligno-cellulosiques des feuilles en présence d'eau en milieu acide et réagissant avec les composés chimiques (dont des oxydes de fer) présents sur la surface d'un rail. Cette réaction produit un composé fer-lignine-cellulose généralement noir aussi retrouvé à la suite d'essais réalisés en laboratoire [54].

II.3.0.2 Cas d'étude n°2 : pertes d'adhérence sur une ligne ferroviaire en zone rurale

II.3.0.2.a Contexte d'étude

En France, une zone d'adhérence dégradée a été choisie pour être expertisée par SNCF Réseau. La diminution de l'adhérence des trains sur cette zone a engendré un arrêt des circulations. Cet arrêt fait suite à la présence d'une importante pollution du rail sur l'une des deux voies composants la plateforme (figure II.24).

Le secteur en question se situe sur la ligne 790 000 reliant St-Germain des Fossés à Nîmes entre les points kilométriques (noté "PK" dans la suite de ce document) 361+500 et 367+000 (zone proche de la ville de Vichy en Auvergne).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

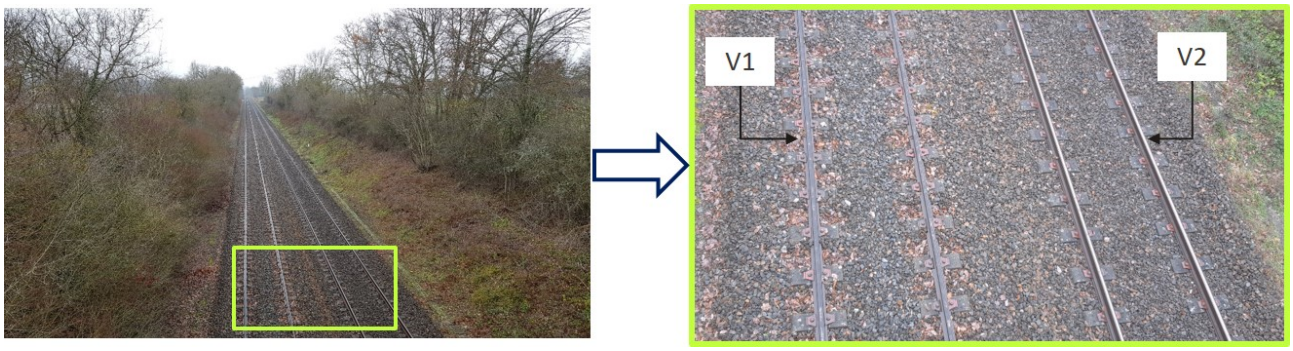


FIGURE II.24 – Photographie de la zone contaminée au point kilométrique (PK) 366+700 prises lors de la tournée d'inspection. À droite, aperçu de la pollution visible sur la voie 1 (V1) et de l'absence de pollution visible sur la voie 2 (V2).

Les caractéristiques des voies 1 et 2 sont exposées ci-après :

Voie 1 :

- Déclivité **positive** comprise entre 3,8 et 8,4 mm/m.
- Ligne faiblement circulée.
- Champignon de profil arrondi (rail de profil U50, rayon de courbure R=200mm) sur les deux files.
- Surface de la table de roulement polluée par des feuilles de chêne sur les deux files de rail.
- Rail U50 de 1978 de nuance R200.

Voie 2 :

- Déclivité **négative** comprise entre 3,8 et 8,4 mm/m.
- Ligne faiblement circulée.
- Champignon de profil arrondi (rail de profil U50, rayon de courbure R=200mm) sur les deux files.
- Surface de la table de roulement lisse et brillante.
- Rail U50 de 1978 de nuance R200.

Les deux voies sont donc identiques en termes de géométrie et de circulation. La principale différence réside dans la pollution identifiée sur l'une des deux voies. Ce cas d'étude permet d'obtenir des informations sur la composition d'un troisième corps retrouvé en voie.

La tournée d'observation en voie a été réalisée un matin du mois de janvier par un temps frais (9°C) et humide, correspondant à des conditions typiques d'adhérence dégradée. L'arrêt des circulations mentionné précédemment est dû à la présence d'un troisième corps externe (qualifié ici de pollution) rendant impossible à nettoyer par brossage (figure II.25).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

(a) (b)

FIGURE II.25 – a) Troisième corps externe polluant retrouvée sur la zone après arrêt des circulations. b) Brosses servant au nettoyage de la surface des rails après passage sur la zone polluée. Les lames métalliques des brosses sont encrassées d'un troisième corps réduisant l'adhérence maximale des trains.

En présence d'humidité, la pollution présente sur le rail est cohésive et adhérente. Elle peut néanmoins s'enlever à l'aide d'un scalpel et sans marquer le rail. En revanche, en conditions sèches, elle se retrouve très adhérente au rail et ne peut être prélevée aisément du rail. Ces observations viennent donc corroborer celles de Chen [124].

Sur le secteur de 5,5 km observé, les deux files de rails de la V1 ne sont pas polluées de la même façon sur l'ensemble de leurs linéaires. Qualitativement, l'épaisseur de la couche de troisième corps est susceptible de varier tous les 50 à 100m du fait de l'adhésion des troisièmes corps à la surface des roues entrainant leurs déplacements sur ces distances. Ce phénomène a d'ailleurs pu être mis en évidence par Berthier et al. [41] à l'aide de l'utilisation de particules d'aluminium. Ces dernières, après passage d'un train ont pu être retrouvées sur des distances de l'ordre de 100m après passage d'un train. Sur les zones les plus polluées, une grande partie de la table de roulement du rail est de couleur noire. Les zones brillantes visibles sur la figure II.25, image de gauche, correspondent à des portions sur laquelle les roues d'un train patinent sur leurs rails.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

FIGURE II.26 – Aperçu de différents troisièmes corps retrouvés sur zone.

En présence d'eau, le troisième corps organique agit comme une éponge et absorbe de l'eau. Il passe d'un état sec, peu épais à état secondaire pour lequel il devient saturé en eau. La figure II.26 met en évidence la présence d'eau (issue de l'humidité ambiante) en surface de cette pollution.

Sur ce secteur de voie, l'origine de la pollution est liée à la présence de feuilles de chêne entre les traverses supportant les rails. En effet, comme indiqué précédemment, la voie 1 est en rampe (pente ascendante) et la voie 2 en pente (pente descendante). Ainsi, lorsqu'un train circule sur la V2, les conducteurs n'appliquent aucun effort de traction. Pour ce mode de circulation, les locomotives génèrent des flux d'air pouvant projeter les feuilles tombées sur la voie contiguë. Ces dernières sous l'effet du souffle du train sont bloquées entre deux traverses lorsqu'un manque de ballast est observé. Les feuilles déjà présentes entre deux traverses peuvent au contraire être extirpées puis projetées sur la surface d'un rail (figure II.27).

FIGURE II.27 – Génération de la couche de troisième corps. Au centre, aperçu de la transformation d'une feuille de chêne écrasée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

II.3.0.2.b Analyse morphologique des troisièmes corps prélevés

N'ayant que très peu d'informations sur la constitution du troisième corps précédent, des observations macroscopiques et microscopiques ont été réalisées avec un microscope numérique photonique Keyence VHF-2000F. Deux échantillons de ce troisième corps numérotés 1 et 2 ont été prélevés aux points kilométriques 363+000 et 364+500 sur les files gauches des rails de la voie 1.

Analyse de l'échantillon n°1

Les échantillons sont prélevés à l'aide d'un scalpel et stockés à température ambiante dans des fioles de volume égal à 50ml scellées hermétiquement. Cela permettant de ne pas ajouter de contaminants externes (poussières, fibres...) et de maintenir l'hygrométrie du site de prélèvement.

L'objectif étant ici de trouver des points remarquables permettant à terme, de reproduire les caractéristiques morphologiques de ces troisièmes corps sur le banc d'essais Triboring.

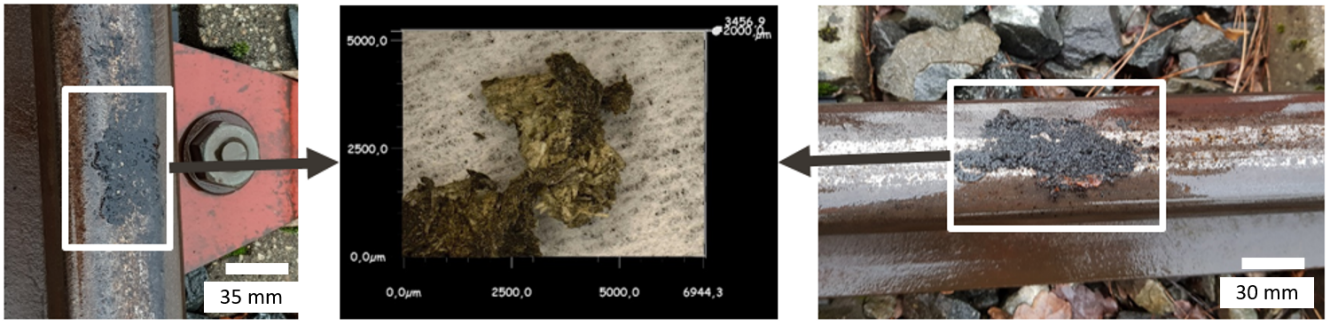


FIGURE II.28 – Aperçu en microscopie photonique d'un échantillon de troisième corps prélevé en voie.

L'échantillon n°1, observé avec un grossissement x30, est composé d'une zone fibreuse et d'une autre sur laquelle il est possible d'apercevoir des morceaux de limbes. Un zoom est alors effectué (figure II.29). Sur ce cliché, les fibres aperçues précédemment correspondent à des nervures de feuille.

Sur les images précédentes, une zone encadrée en blanc, est agrandie. Des cristaux de longueur variant entre 100 et 500µm sont observables, le plus grand est entouré en vert. Du fait de leurs tailles, ces cristaux peuvent correspondre à des grains de sable. Enfin, la présence de filaments d'une taille inférieure à 100µm (zone entourée en blanc) est aussi mise en évidence. Ces derniers peuvent correspondre aux fibres de celluloses présentes dans la paroi d'une feuille. L'aspect fibreux de cet échantillon est aussi visible sur la figure II.30 correspondant à des observations réalisées par microscopie électronique à balayage. La présence de silicium et de calcium mise en évidence par

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

analyse EDX peut appuyer l'identification de particules de sable dans le volume de cet échantillon.

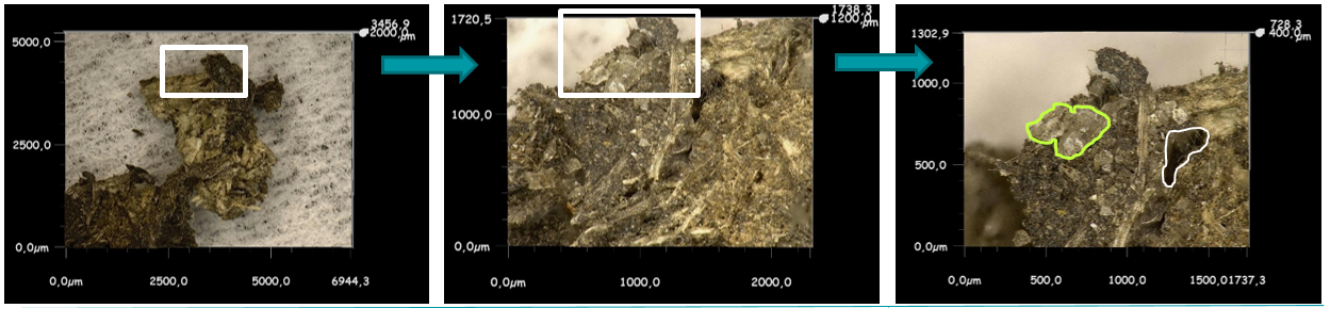
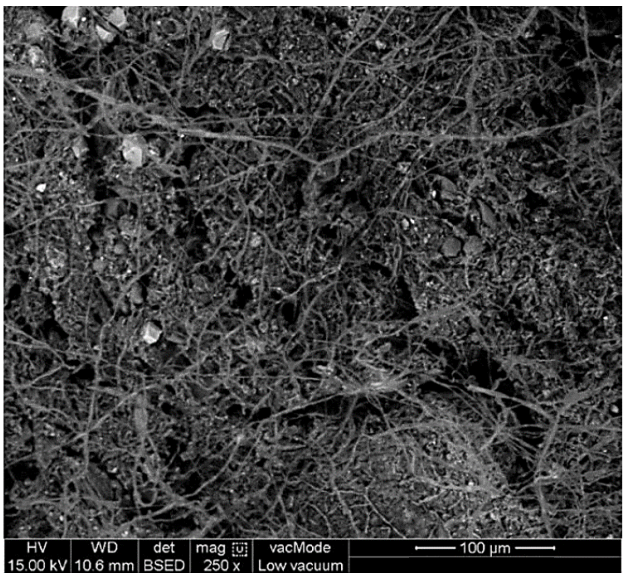
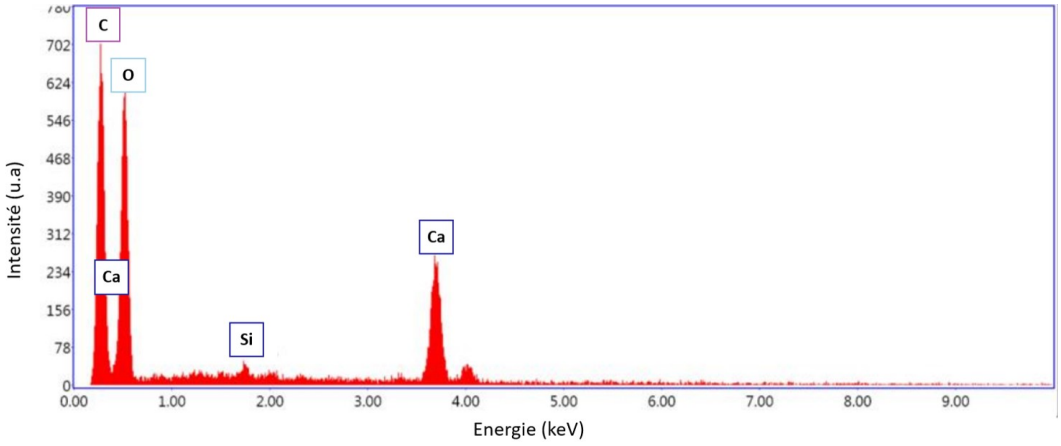


FIGURE II.29 – Observation de l'échantillon n°1 par microscopie optique. Les grossissements sont (de gauche à droite) égaux à x30, x150, et x200



(a)



(b)

FIGURE II.30 – a) Observation par microscopie électronique à balayage de l'échantillon de troisième corps prélevé n°1 révélant une structure fibreuse (15kV, vide partiel, détecteur BSE, mode contraste atomique) b) Analyse EDX associée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Analyse de l'échantillon n°2

L'échantillon n°2 correspond au troisième corps prélevé au PK 364+500. Le premier cliché est réalisé avec un grossissement égal à x50. Comme pour l'échantillon n°1, la présence de zones fibreuses est mise en évidence. Le second cliché retenu est aussi pris avec un grossissement x50 mais est en mode HDR (High Dynamic Range), permettant d'accentuer les contrastes. En agrandissant la zone avec un grossissement x200, quelques fibres présentes dans une matrice végétale sont visibles.

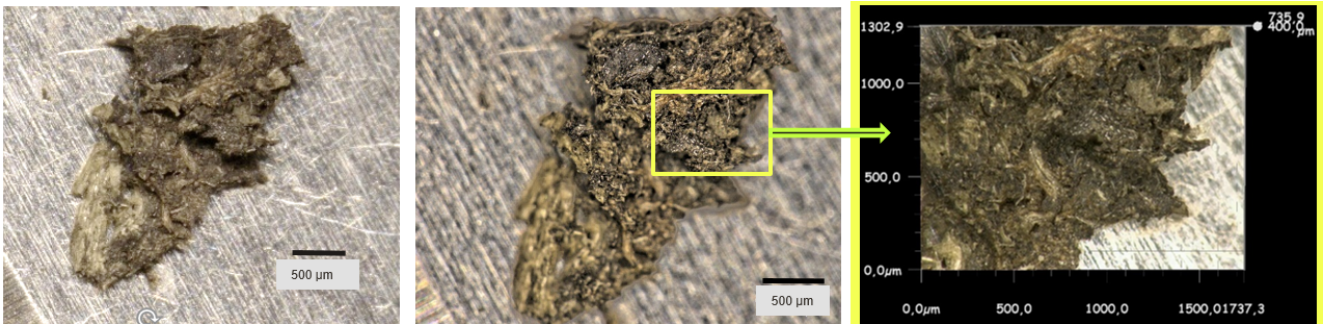
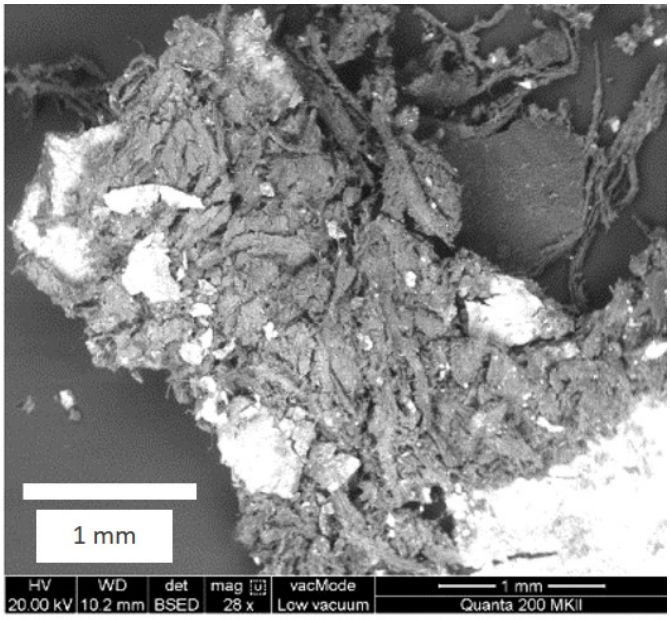


FIGURE II.31 – Observation de l'échantillon 2 par microscopie optique. Les grossissements sont (de gauche à droite) de x50, x50 + HDR, et x200.

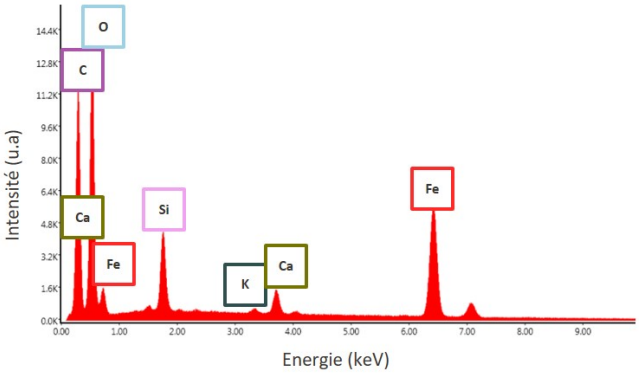
Ces fibres sont aussi visibles grâce à la réalisation d'observations de ce troisième corps par microscopie électronique à balayage couplées à une analyse EDX de l'ensemble. Ces données sont reprises sur la figure II.32. L'analyse EDX fait notamment apparaître les raies Kα et Lα de l'atome de fer indiquant la présence de cet élément en surface de ce troisième corps.

De même, la présence de la raie Kα de l'atome de silicium peut être associée à l'application de sable sur la surface des rails dans le but d'atténuer les pertes d'adhérence rencontrées. À titre de rappel, les effets de l'ajout de sable sur la surface des rails pour limiter une perte d'adhérence sont évoqués en partie I.4.2.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)

FIGURE II.32 – a) Observation par microscopie électronique à balayage de l'échantillon de troisième corps prélevé n°2 (20kV, vide partiel, détecteur BSE, mode contraste atomique) b) Analyse EDX associée.

II.3.0.2.c Eléments remarquables issus de l'analyse de troisièmes corps réels

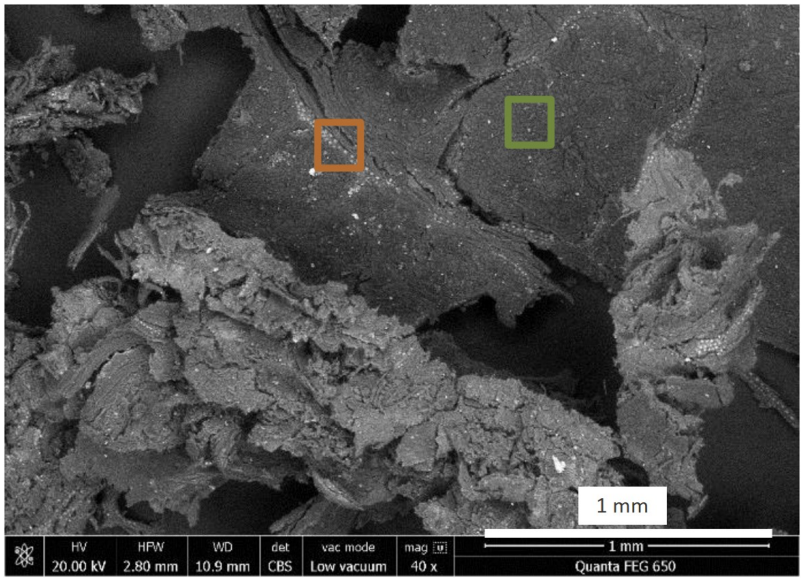
À des fins de comparaison avec les échantillons précédents, d'autres échantillons de troisième corps sont prélevés après un incident de patinage impactant la sécurité et la régularité d'une circulation ferroviaire. Leurs observations sont synthétisées ci-après.

Ils sont observés via microscopie électronique à balayage et analysés par spectroscopie EDX. Des éléments observés sur les troisièmes corps précédents sont aussi mis en exergue grâce à cet outil. La présence de stomates et de cristallisations est notamment identifiée (figure II.33).

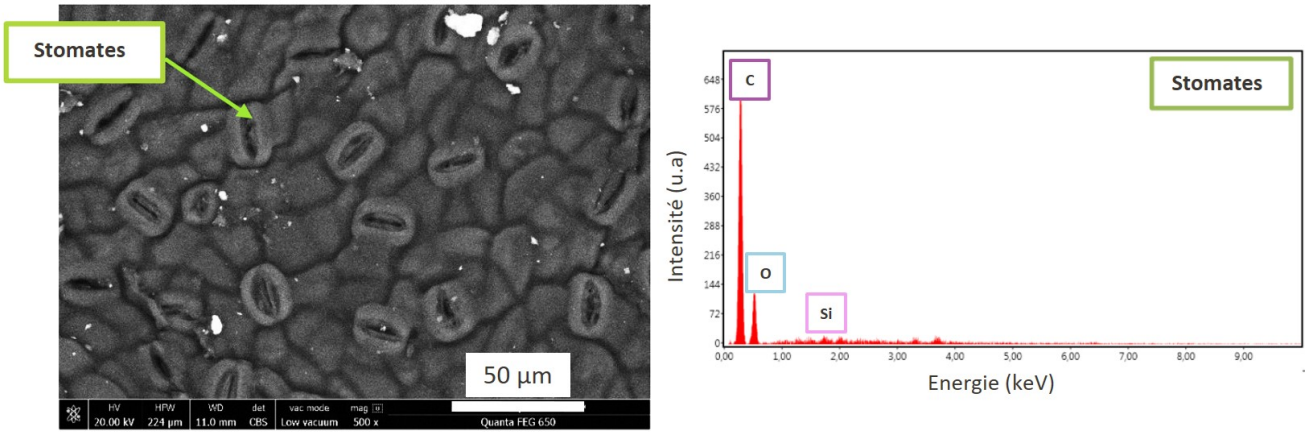
À ce stade des observations et analyses effectuées, des éléments permettant de décrire la composition atomique sont obtenus.

Des prélèvements correspondants à des échantillons secs et adhésifs à la surface d'un rail (figure II.34) sont réalisés et étudiés par MEB + EDX. La présence de particules organiques d'origine biologique couplée à des particules inorganiques est révélée (figure II.35).

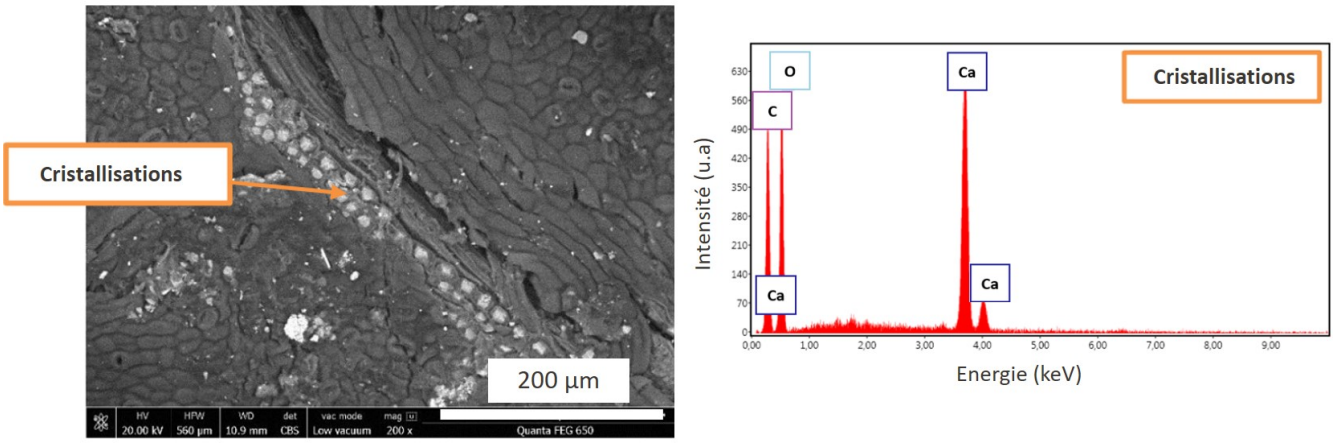
Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)



(c)

FIGURE II.33 – Observation d'un échantillon de troisième corps réel après patinage. Analyse MEB (20kV, vide partiel, détecteur BSE, mode contraste atomique) + EDX a) Echantillon global b) Zone composée de stomates c) Zone composée de cristallisations.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

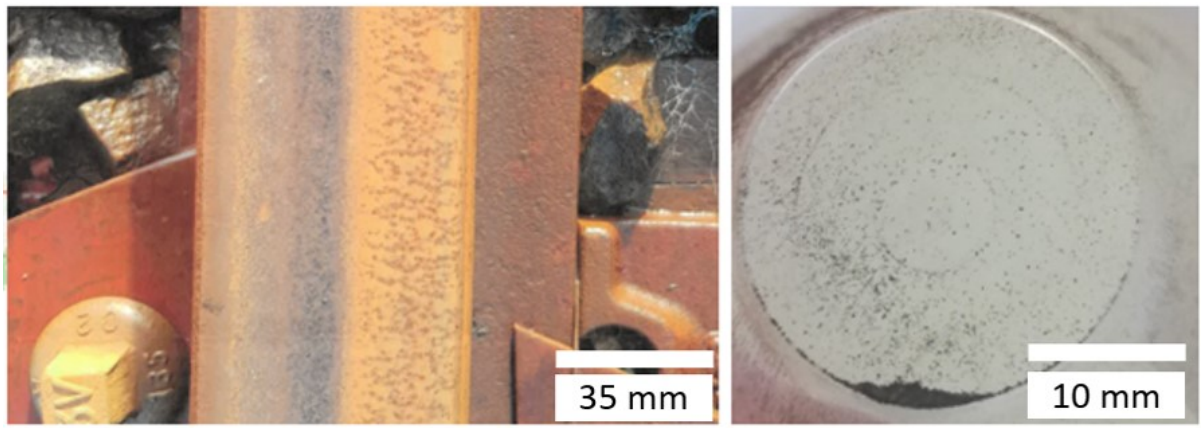
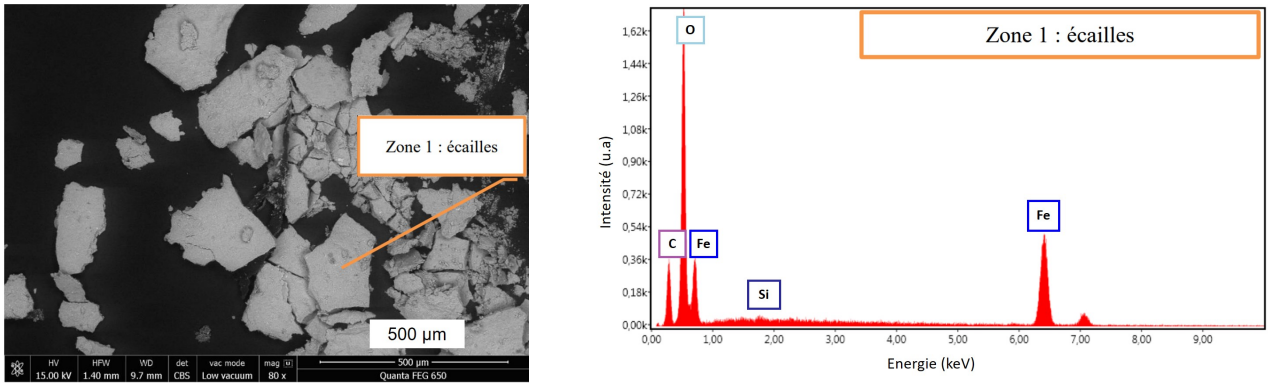


FIGURE II.34 – Aperçu d'un échantillon sec et adhésif prélevé sur un passage à niveau d'une ligne ferroviaire. Les particules visibles sur l'image de droite sont prélevées à l'aide d'un scotch aluminium posé transversalement à la surface du rail.

Sur ces mêmes échantillons, d'autres zones analysées laissent apparaître la présence de particules d'oxydes de fer hydratées ainsi que de résidus organiques décomposés (figure II.35). Ces résultats d'analyses recoupent des éléments obtenus par Chen et al. [124].



(a) (b)

FIGURE II.35 – Analyses MEB + EDX d'un échantillon sec et adhésif de troisième corps sec et adhésif prélevé sur un passage à niveau d'une ligne ferroviaire a) Observation par microscopie électronique à balayage (15kV, vide partiel, détecteur BSE, mode contraste atomique) de l'échantillon b) Analyse EDX associée.

Ainsi, chaque automne au cours de ces travaux de thèse, une vingtaine d'échantillons issus de pertes d'adhérence associées à la présence de feuilles mortes humides est analysée. Des particules végétales en décomposition, des oxydes de fer hydratés, et une structure spongieuse et fibreuse (figure II.36) des éléments prélevés sont mis en évidence sur ces analyses (figure II.37).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

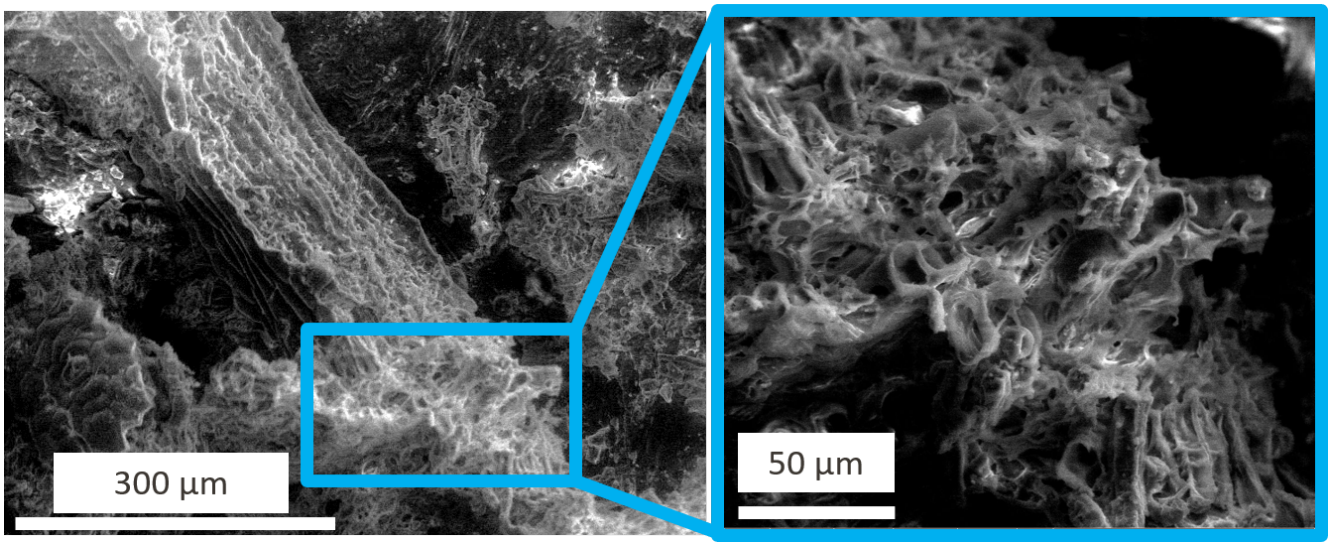


FIGURE II.36 – Mise en évidence de la présence d'une structure fibreuse et spongieuse d'un troisième corps prélevé lors d'essais sur le banc Triboring pour un taux de glissement de 0.5% et une hygrométrie relative initiale des feuilles mortes supérieure à 85% (image MEB, 15 kV, mode vide partiel, détecteur SE).

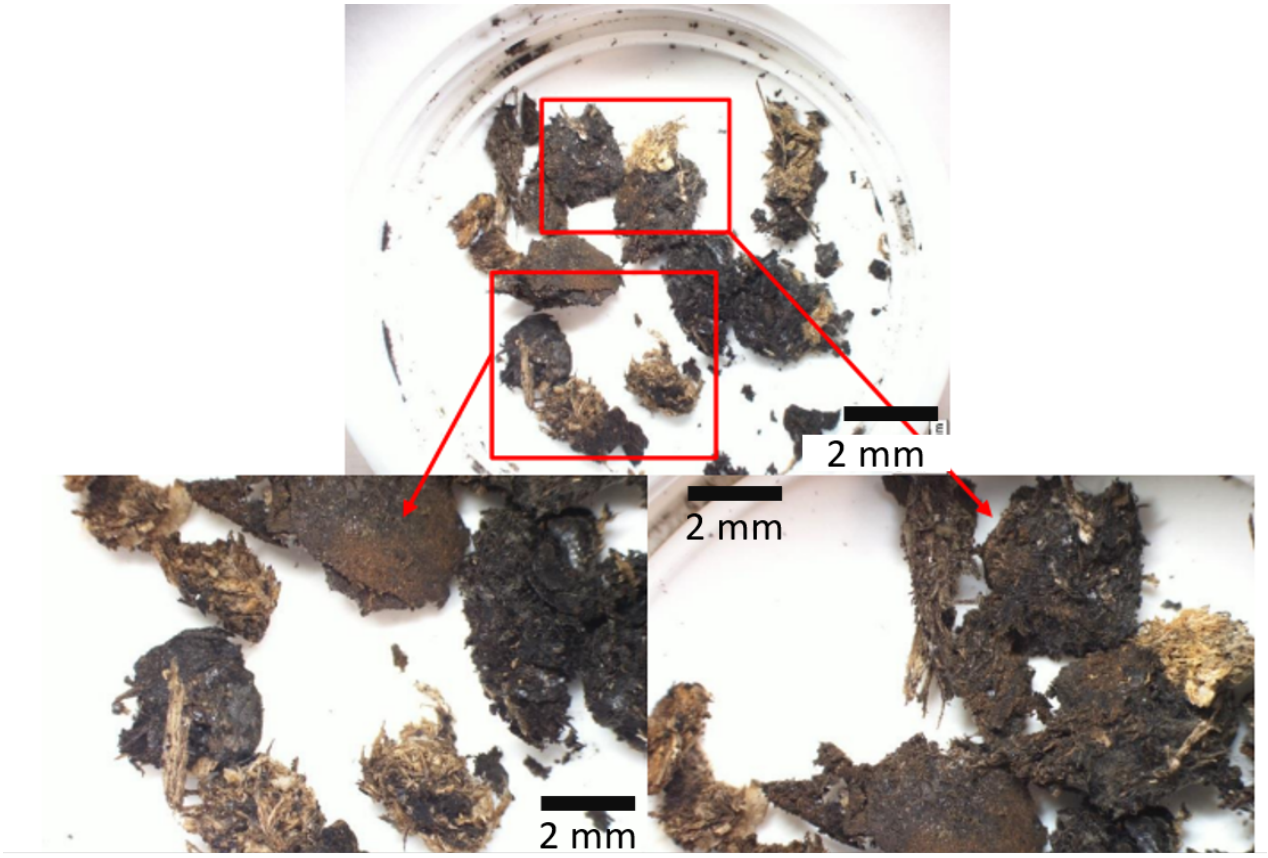
II.3.0.3 Conclusions associées aux analyses morphologiques

Les analyses d'échantillons issues de zones ayant subies des pertes d'adhérence ont permis de mettre en évidence la présence d'éléments communs retrouvés sur des prélèvements effectués sur différentes zones géographiques.

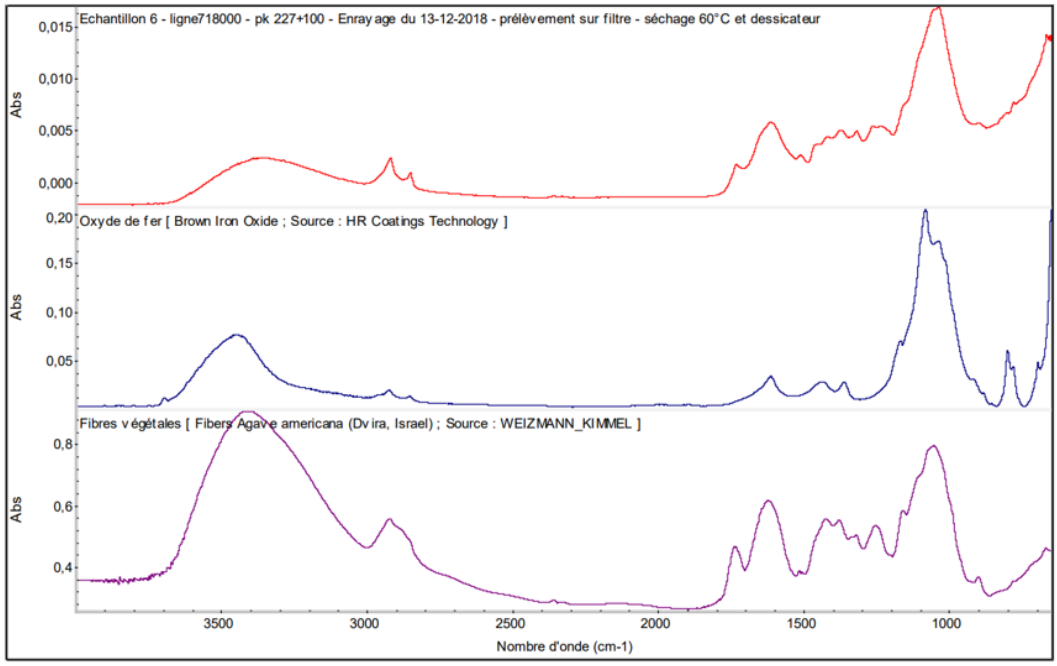
Les deux premiers échantillons observés laissent apparaître la présence de fibres issues probablement des macromolécules de cellulose. Il est donc possible que les fibres présentes dans ce troisième corps jouent le rôle de renfort lorsqu'ils sont couplés à une matrice d'éléments provenant des parois ligno-cellulosiques des feuilles. Des exemples de structures fibreuses de troisièmes corps réels sont visibles sur les figures II.29 et II.32. Cette hypothèse permettrait d'expliciter la cohésion d'un point de vue mécanique de ces composés.

Des particules d'oxydes de fer hydratés sont aussi retrouvées après analyse par spectrométrie EDX et FT-IR (figures II.37 et II.38). Des bandes d'absorptions sont obtenues pour de même nombres d'ondes lors de l'analyse des échantillons prélevés et de celle d'un oxyde de fer (III). Il est donc probable que des liaisons chimiques communes aux deux échantillons soient activées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



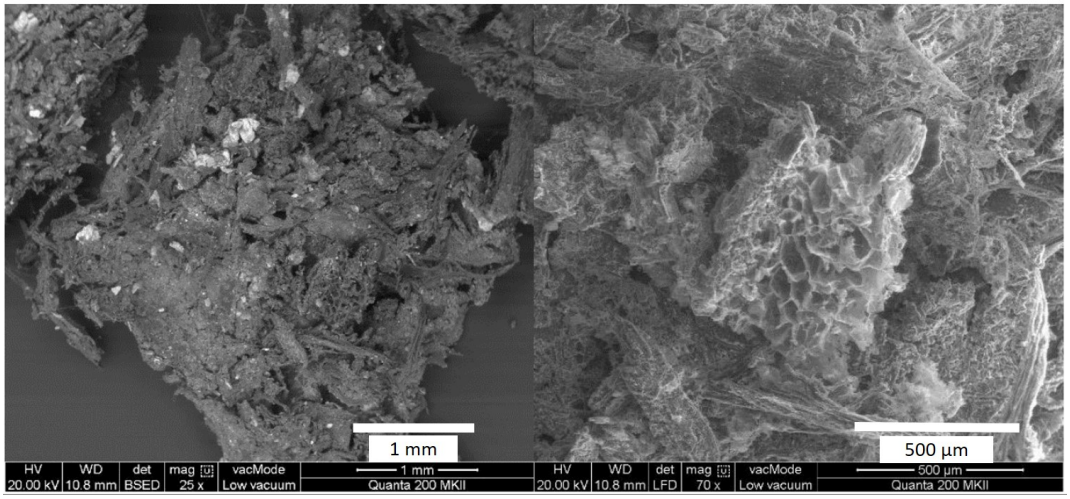
(a)



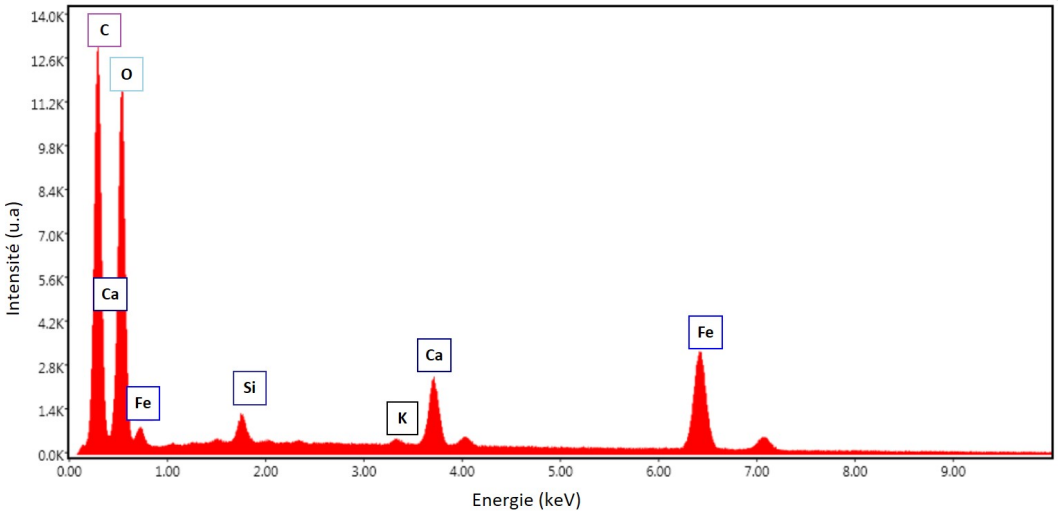
(b)

FIGURE II.37 – a) Photographie d'un échantillon de troisième corps prélevé après un incident de patinage b) Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)

FIGURE II.38 – Suite des analyses d'échantillons visibles sur la figure II.37 a) Analyse MEB (20kV, vide partiel, détecteur BSE) b) Analyse EDX associée.

La présence d'eau est associée à la mise en évidence de bandes d'absorptions infrarouges liées à des liaisons atomiques faisant intervenir des atomes d'hydrogène et d'oxygène. Ces différentes bandes d'absorptions peuvent alors servir de traceurs de l'évolution des transformations physico-chimiques induites par la présence d'eau dans le troisième corps.

Enfin, la réalisation d'observations par microscopie optique photonique a permis de mettre en évidence des changements de couleurs des troisièmes corps. En effet, pour les mêmes conditions d'observations (lumière, résolution), le changement de couleur d'un troisième corps peut être considéré comme un indicateur qualitatif traduisant l'occurrence de transformations physico-chimiques. À titre d'exemple, le changement de couleur des feuilles en automne résulte de la diminution de la production de chlorophylle dans ses cellules [125]. De même, le passage d'une couleur brun clair à

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

une couleur noire d'un mélange d'eau de feuilles mortes et d'acier est synonyme d'une réaction liée à la formation d'un complexe entre la lignine composant une feuille et le fer en milieu aqueux [54]. Dernier exemple, la rouille est généralement formée par la réaction du fer, de l'oxygène et de l'eau ou de l'humidité de l'air et se trouve à la surface d'un acier corrodé. La présence d'une couleur rouge-brun [126] est synonyme d'une augmentation du degré d'oxydation du troisième corps formé. Ainsi, l'observation des changements de couleur d'un troisième corps peut être utilisée comme un moyen qualitatif pour déterminer l'occurrence de réactions physico-chimiques survenant au contact.

II.4 Conclusions

L'état de l'art actuel associé aux variations d'adhérence d'un contact rail-roue permet d'identifier des couplages mécaniques et physico-chimiques. Ces derniers sont initialement liés à l'application d'un taux de glissement et à la présence d'un troisième corps externe d'origine organique au contact.

Les éléments repris dans ce chapitre servent ainsi à définir une campagne d'essais paramétrique pour laquelle deux facteurs influant sur l'adhérence sont utilisés. L'analyse des résultats obtenus est effectuée à l'aide de critères mécaniques et énergétiques corrélés aux variations des facteurs de frottement mesurés.

Cette campagne sera réalisée à l'aide du banc Triboring. Ce tribomètre reproduit de façon réaliste les circuits tribologiques, et la cinématique d'un contact rail-roue réel à une échelle 1/15. Elle est complétée par l'obtention d'éléments d'analyses physico-chimiques associées aux morphologies de différents troisièmes corps réels. Ces derniers sont identifiés grâce à des outils d'analyses dont le fonctionnement a pu être expliqué au cours de ce chapitre.

Le chapitre suivant explicite ainsi une campagne d'essais visant à reproduire une perte d'adhérence sur Triboring dans des conditions contrôlées. Cette dernière est effectuée avec l'ensemble des outils et méthodes présentés jusqu'à maintenant.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre III

Reproduction expérimentale d'une perte d'adhérence pour des conditions contrôlées : étude d'un cas spécifique

Sommaire

III.1 Validation de la reproductibilité des essais 136
III.1.1 Reproductibilité des essais sur le banc d'essai Triboring sans troisième corps externe 136
III.1.2 Reproductibilité des essais sur le banc d'essai Triboring en présence d'un troisième corps externe de type feuilles mortes 137
III.2 Essais d'adhérence avec un troisième corps externe. Application à un taux de glissement de 1% et une hygrométrie relative de 50% . . . 140
III.2.1 Caractérisation des variations monotones d'adhérence 140
III.2.2 Caractérisation qualitative des débits tribologiques 142
III.2.3 Conséquences de l'activation de débits de recirculations longitudinaux . 145
III.2.4 Analyses mécaniques énergétiques des variations d'adhérence 148
III.3 Conclusions 168

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans l'état de l'art, aucun essai d'adhérence impliquant un troisième corps externe de type feuilles mortes ne semble avoir été réalisé sur un tribomètre de type galet sur couronne. Cette géométrie permet d'étudier les variations d'adhérence en simulant des conditions limites représentatives du contact rail-roue. Cet outil est donc particulièrement adapté pour poursuivre les travaux réalisés jusqu'à présent sur cette thématique.
L'objectif de ce chapitre est ainsi de présenter la démarche d'analyse et les résultats liés à la reproduction d'une perte d'adhérence en présence de feuilles mortes dans un contact rail-roue. Dans un premier temps, une seule condition tribologique initiale est appliquée aux troisièmes corps (taux de glissement égal à 1% et hygrométrie relative égale à 50%). Ce cas spécifique d'étude permet d'imposer des conditions intermédiaires relatives aux paramètres repris sur le tableau II.3. Dans un second temps la réalisation d'une étude paramétrique associée à ces conditions sera présentée au chapitre IV.

III.1 Validation de la reproductibilité des essais

III.1.1 Reproductibilité des essais sur le banc d'essai Triboring sans troisième corps externe

L'étude des variations d'adhérence proposée dans ce chapitre nécessite de vérifier le caractère reproductible des facteurs de frottement mesurés sur banc.

Le banc d'essais Triboring a été utilisé pour la réalisation d'études visant à comprendre des mécanismes de générations de défauts fissurant les rails [15] [118]. Ces travaux ont permis de prouver que Triboring est adapté à l'étude du contact rail-roue (voir aussi partie II.2.2). Les données initialement mesurées sur ce banc peuvent être modérément bruitées. Par conséquent, afin de supprimer les perturbations liées à la signature vibratoire du banc [29], une moyenne mobile sur une durée de 4.4s (correspondant à un tour de couronne) est effectuée à la suite de l'ensemble des essais de ce chapitre. Cette méthode de traitement du signal supprime simplement les perturbations issues des hautes fréquences d'un signal.

La mesure des efforts normaux et tangentiels sert à définir un facteur de frottement (voir partie II.2.3) qui permet de relier les variations d'adhérence d'un train aux données expérimentales (partie II.2.3).
Cette grandeur calculée à partir des mesures effectuées sur le banc Triboring est répétable, pour de mêmes conditions d'essais. Merino [29] a notamment pu le vérifier lors d'essais réalisés sans ajout d'un troisième corps externe (figure III.1). Le calcul des écarts-types obtenus après post-traitement (échantillonnage et moyenne mobile) des données révèle des écarts de mesures de l'ordre de 5%.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

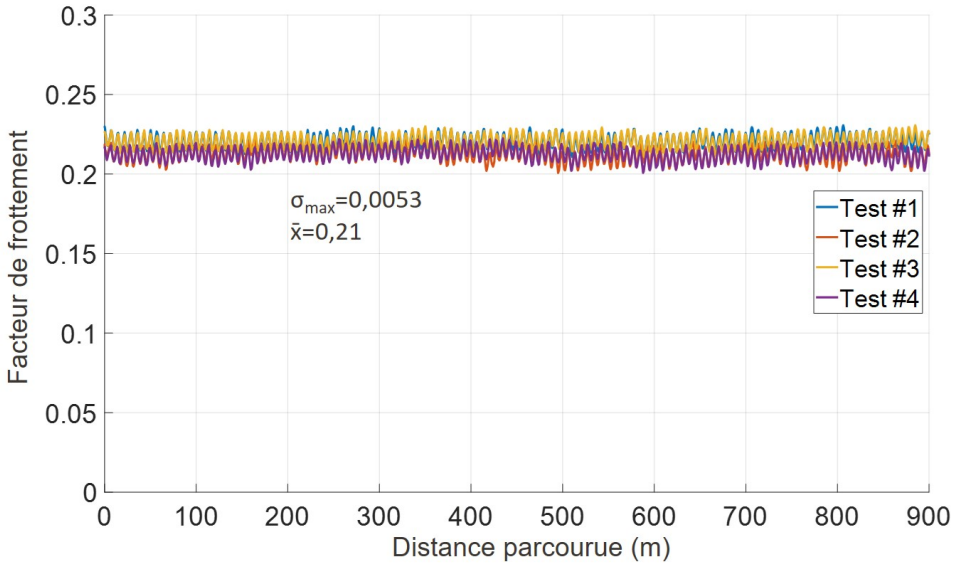


FIGURE III.1 – Répétabilité des essais réalisés avec un taux de glissement de 0.5% et utilisant un galet en acier R260. Valeur moyenne : 0.21, écart-type maximum : 0.0053.

La répétabilité des mesures est aussi observée lors de l'ajout d'un troisième corps externe de type feuilles mortes dans le contact. Elle est néanmoins associée à de plus grands écarts de mesure. Cet élément est mentionné en partie III.1.2.

III.1.2 Reproductibilité des essais sur le banc d'essai Triboring en présence d'un troisième corps externe de type feuilles mortes

L'objectif de cette section est de démontrer la répétabilité des grandeurs calculées et mesurées en présence de feuilles après essais sur le banc Triboring.

Des feuilles de platane sont utilisées pour l'ensemble des essais. Cette espèce étant communément retrouvée après un enrayage ou un patinage.

Elles sont positionnées sur une zone d'une longueur de 20cm. Cette zone (figure III.2) vise à reproduire les phénomènes "d'encrassement" retrouvés sur la surface d'une roue réelle (figure III.3) et est adaptée au diamètre des galets utilisés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

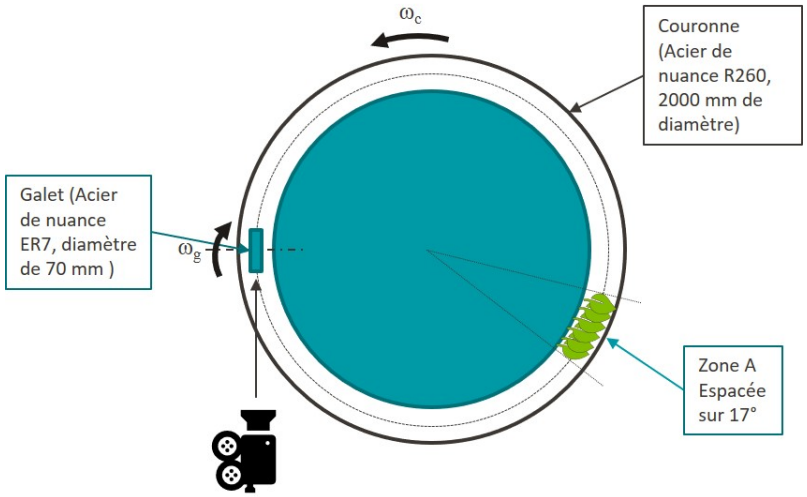
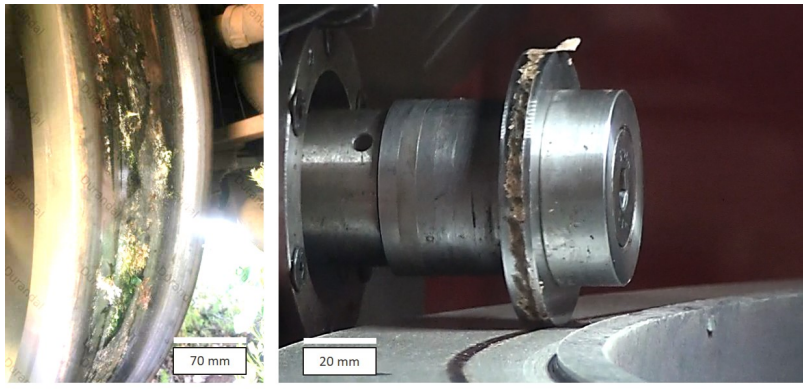
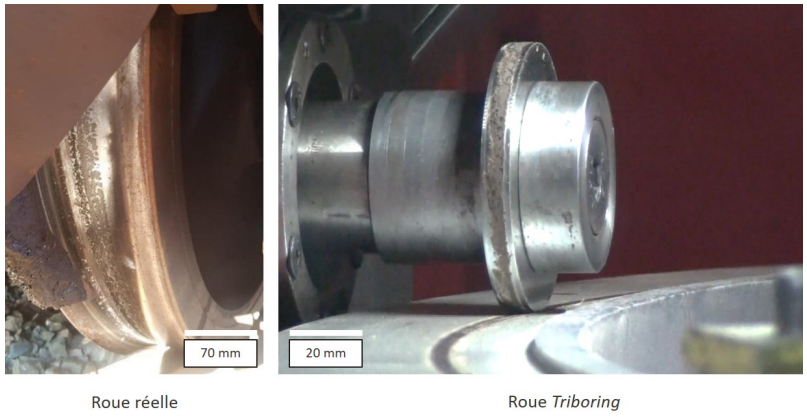


FIGURE III.2 – Illustration du placement du troisième corps étudié sur le banc Triboring.



(a)



(b)

FIGURE III.3 – Troisième corps externe réel à l'origine d'un incident (feuilles mortes) sur une roue d'un engin automoteur et de la surface d'un galet utilisé lors d'un essai d'adhérence sur le banc Triboring. Les images a) et b) sont prises pour des distances parcourues sur banc après 130m et 340m.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Très peu d'informations liées aux conditions cinématiques associées aux roues réelles photographiées sur la figure précédente sont disponibles. Pour autant, la réalisation d'essais sur Triboring permet de mettre en évidence des morphologies de troisièmes corps comparables entre les deux solides après 130m et 340m parcourus sur le banc.
Dans le cas de la figure III.3a, des morceaux de feuilles ont adhéré de façon discontinue sur les bandes de roulement des deux solides. Une couche de couleur similaire est aussi retrouvée sur ces mêmes surfaces.
Dans le cas de la figure III.3b, les troisièmes corps ne permettent pas d'identifier pour une même échelle d'observation des morceaux de feuilles. Un écran (au sens tribologique du terme, voir partie I.2.5.2) recouvre la bande de roulement des deux solides.
Il est intéressant de noter que les photographies des galets sont prises pour une seule condition d'essai (taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%) et différentes distances parcourues. Pour ces deux situations, les troisièmes corps visibles sur les roues et galets sont comparables en termes de morphologie. Plus généralement, afin d'appuyer ce fait, des analyses du troisième corps formé au cours d'un essai, et similaires à celles présentées en partie II.3, sont effectuées au cours de ce chapitre.

Contrairement à la réalisation d'essais sans feuilles, le troisième corps ajouté ici peut être difficilement identique d'un essai sur un autre. La répétabilité des essais va entre autres être modulée par les variations naturelles d'hygrométrie et de température mesurées qui sont liées à l'environnement direct du banc d'essai. La figure III.4 illustre cette idée.

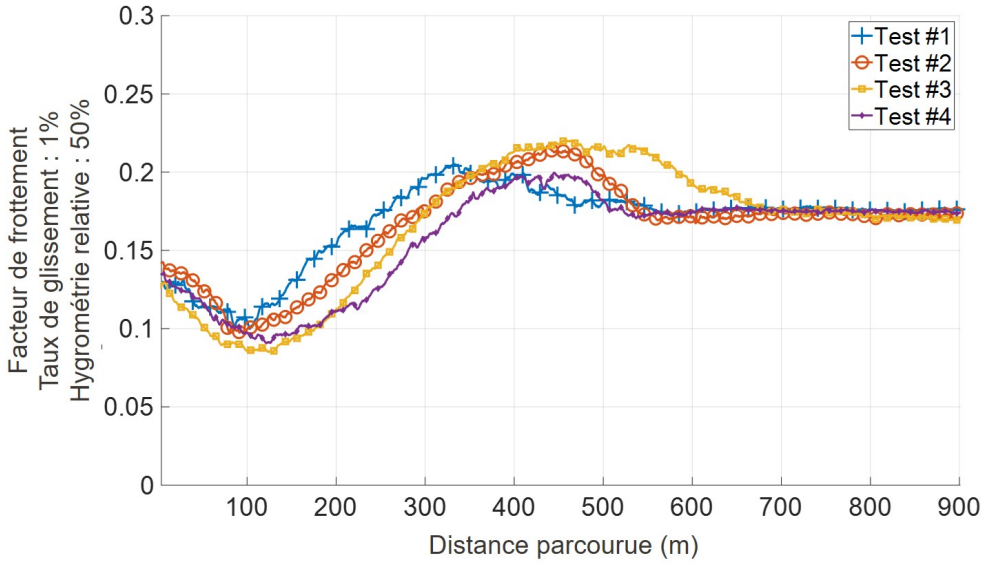


FIGURE III.4 – Preuve de répétabilité d'une série d'essais réalisée avec un taux de 1% et une hygrométrie relative de 50%, valeur moyenne : 0.17, écart-type maximum : 0.031.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Les essais #1 et #2 ont été réalisés en hiver avec une température ambiante mesurée de 15 °C et une hygrométrie relative mesurée de 51%. L'essai #3 a été réalisé en été avec une température ambiante mesurée de 25°C et une hygrométrie relative de 54%. L'essai #4 est quant à lui réalisé en automne avec une température ambiante égale à 20°C et une hygrométrie relative de 47%.

Les différentes courbes visibles sur la figure III.4 présentent des variations similaires mais ne peuvent être superposées de bout en bout. Les principales différences visibles sont attribuées aux variations d'hygrométrie relative de l'ordre de 7%. Le facteur de frottement moyen est dans ce cas égal à 0.17, l'écart-type maximum calculé est de 0.031. Ces résultats permettent d'obtenir une incertitude sur les différentes mesures réalisées de l'ordre de 15%. Cette valeur, obtenue après la réalisation d'essais pour lesquelles les conditions d'hygrométrie relative sont les moins maitrisées, est retenue pour le calcul d'incertitudes pour l'ensemble des données mesurées.

La répétabilité des mesures effectuées lors d'une série d'essais est donc confirmée.

III.2 Essais d'adhérence avec un troisième corps externe. Application à un taux de glissement de 1% et une hygrométrie relative de 50%

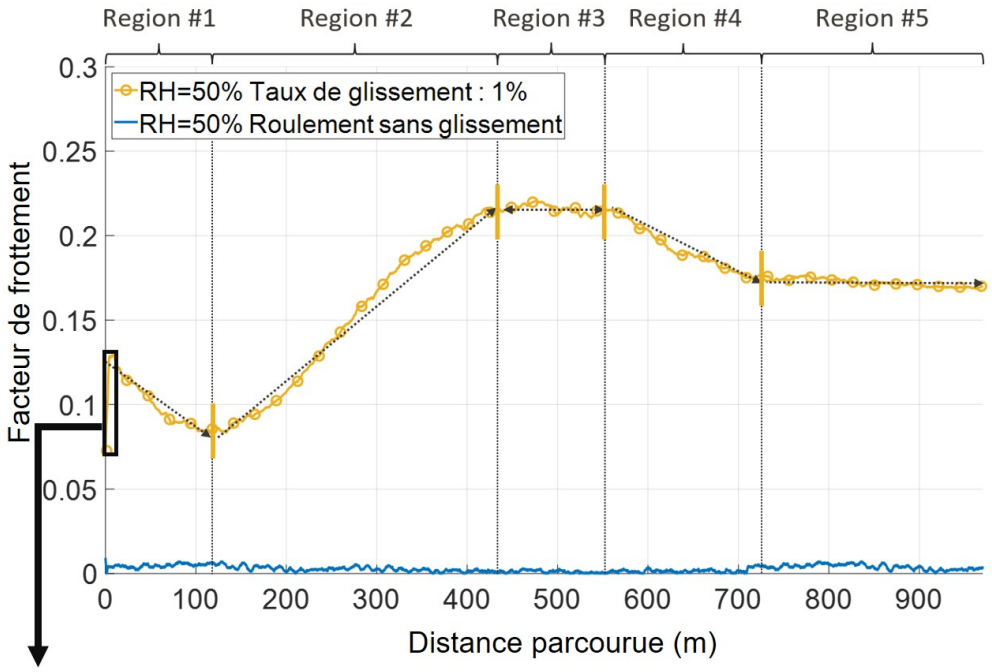
III.2.1 Caractérisation des variations monotones d'adhérence

Cette partie présente la démarche d'essai et d'analyse suivie pour une condition intermédiaire : le taux de glissement imposé est ici de 1%, l'hygrométrie relative est de 50%.

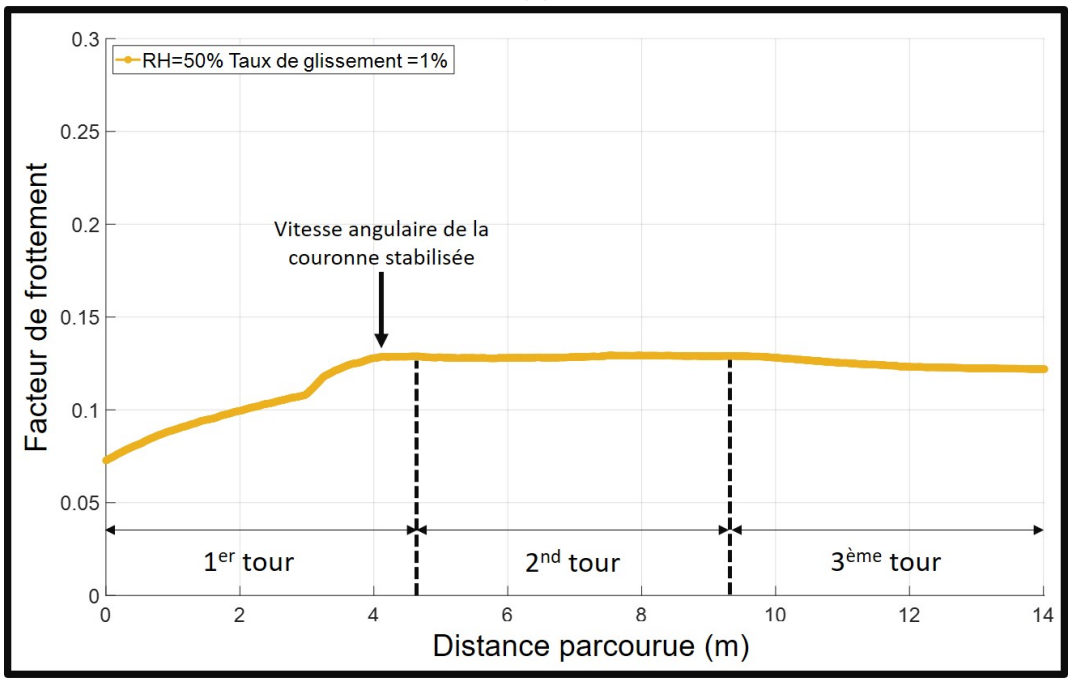
L'étude des variations d'adhérence du contact est réalisée au travers d'une analyse mécanique (basé sur l'évolution du facteur de frottement), énergétique (basé sur le calcul de l'énergie dissipée par frottement), et physico-chimique (basé sur l'activation de liaisons chimiques).

Le facteur de frottement mesuré pour les conditions d'essais imposées dans ce chapitre est mis en parallèle de celui obtenu pour une condition de roulement sans glissement (figure III.5a). Imposer un roulement sans glissement en présence d'un troisième corps externe génère un facteur de frottement non nul mais proche de 0 (valeur moyenne : 0.003, écart-type : 0.001). L'obtention de valeurs non-nulles pour un essai de roulement "pur" est justifiée par Merino [29]. Le taux de glissement imposé correspond à celui du centre de l'ellipse de contact. Celui-ci n'étant pas ponctuel, de faibles variations surviennent en son sein. L'incertitude associée au taux de glissement est de ±0.02%. L'utilisation d'un taux de glissement de 0% génère ainsi un facteur de frottement très faible mais cohérent avec les conditions d'essais imposées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)

FIGURE III.5 – a) Facteur de frottement. Taux de glissement : 1%, hygrométrie relative moyenne : 50%. Le facteur de frottement mesuré à partir de conditions d'essais en roulement sans glissement et en présence du troisième corps externe étudié est aussi tracé. La partie encadrée noire est reprise sur la figure b) Zoom sur les premiers mètres parcourus liés au démarrage du banc.

L'évolution du facteur de frottement au travers des grandeurs d'efforts mesurées sur le banc Triboring permet de retrouver des variations caractéristiques du fonctionnement des logiciels d'anti-

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

patinage (partie II.9) à glissement imposé. Le facteur de frottement : initial, (lors de la mise en mouvement du banc), minimum (obtenue après 100m de glissement), maximum, et stabilisé servent à définir 5 régions pour lesquelles cette donnée évolue de façon monotone.

La **région n°1** est associée à une diminution du facteur de frottement équivalente à une perte d'adhérence (ici, un patinage, du fait de l'utilisation d'un taux de glissement positif). Une précision concernant les 5 premiers mètres parcourus (correspondant à 0.9 cycle de la couronne du banc Triboring) est à ajouter sur cette phase. Les valeurs de frottement mesurées sont associées à une phase transitoire liée à la mise en mouvement du banc jusqu'à l'obtention d'une vitesse angulaire stabilisée.
La **région n°2** est associée à une hausse pseudo-linéaire du facteur de frottement.
La **région n°3** correspond au facteur de frottement maximal sur l'ensemble des essais réalisés. Cette grandeur est constante sur une distance de l'ordre de 100m. Cette stabilisation n'est cependant pas pérenne. Ce facteur peut donc être nommé "facteur de frottement maximal transitoire".
La **région n°4** correspond à une diminution du facteur de frottement et peut être assimilée à une région de transition entre l'obtention d'un facteur de frottement maximal transitoire et un autre stabilisé mais permanent.
La **région n°5** correspond quant à elle à une stabilisation du facteur de frottement permettant de définir la fin d'un essai.

III.2.2 Caractérisation qualitative des débits tribologiques

Les variations du facteur de frottement sont complétées par des images optiques (photographies et vidéos) de la surface du galet et de la couronne. Ces dernières ont été prises pour des distances parcourues de 130m (frontière région n°1 et n°2), 340m (fin de la région n°2), 540m (frontière région n°3 et n°4), et 734m (frontière région n°4 et n°5). Ces données (figure III.6) ont permis de mettre en évidence l'activation de différents débits de troisième corps pour chacune des régions mentionnées précédemment.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

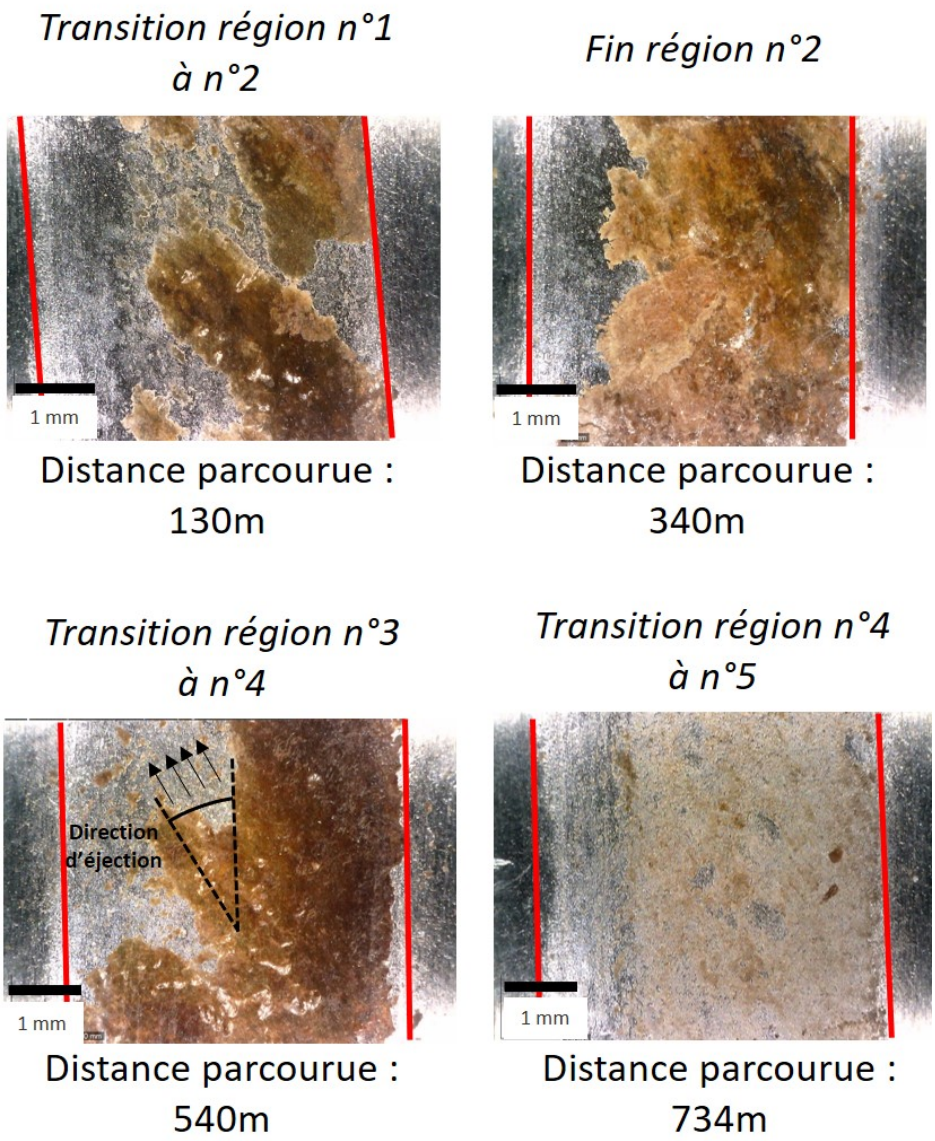


FIGURE III.6 – Photographie de la surface d'un galet (taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%) pour différentes distances parcourues. La largeur de la bande de contact est délimitée en rouge.

Région n°1 :

Les vidéos prises tout au long des essais ont permis de mettre en évidence l'activation de débits source externe, d'éjection (usure) transversal, et de recirculation longitudinale du troisième corps. Le débit source externe est mis en évidence au travers de l'adhésion à la surface du galet des feuilles utilisées. Le débit d'éjection transversal est constaté par l'éjection de la surface d'un galet de particules de feuilles transversalement à la direction de roulement. Le débit de recirculation longitudinal est quant à lui identifié grâce à la présence de particules de feuilles disséminées sur la trace de contact au niveau de la couronne (hors de la zone A).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

De façon qualitative, le troisième corps formé est discontinu et homogène (d'un point de vue colorimétrique). Il est aussi cohésif mais faiblement adhésif à la surface du galet. Ce type de troisième corps au contact peut alors être synonyme d'une réduction de l'adhérence au contact. Jusqu'à la fin de cette région, l'activation des débits d'éjection et de recirculation est constatée durant les essais grâce aux enregistrements vidéo.

Région n°2 :

Les débits d'éjection transversaux diminuent au profit des débits de recirculation longitudinaux. La largeur occupée sur la surface du galet par le troisième corps formé augmente. La largeur apparente de l'ellipse de contact est mesurée à l'aide d'un microscope numérique portable et n'évolue pas significativement (variations mesurées inférieures à 10%) durant cet essai. Le troisième corps formé change de couleur à partir de la fin de la région n°2 ce qui traduit qualitativement des modifications physico-chimiques. Le facteur de frottement augmente pour tendre vers un maximum au cours de cet essai.

Région n°3 :

L'obtention d'un facteur de frottement maximal formant un plateau avant une décroissance (région n°4) sert à définir la région n°3. Une activation du débit d'éjection est constatée. La couche formée est éjectée du contact selon une direction formant un angle compris entre 10 et 45 degrés par rapport à la direction longitudinale de roulement (figure III.6, distance parcourue de 540 mètres). Cela a pu être mis en évidence par Mérino [29] et justifié par la cinématique du banc d'essai.

Régions n°4 et n°5 :

La région n°4 est associée à une augmentation du débit d'éjection identifié précédemment. Ces débits sont équivalents à un "nettoyage" de la surface du galet. Pour autant, il est intéressant de noter que le facteur de frottement diminue dans cette région et devient constant à partir du moment où les débits d'éjection ne sont plus activés (région n°5). En revanche, des écrans (sites S2) sont mis en évidence sur la surface des galets (différence d'état de surface de la bande de contact et de la bande hors contact). Cette couche mince est associée à la mesure d'un facteur de frottement constant en fin d'essai qui est supérieur aux valeurs obtenues au début de la région n°1.

Le nettoyage des écrans est effectué "mécaniquement" en laissant fonctionner le banc d'essai Triboring au taux de glissement défini au début d'un essai. La mesure d'un couple moteur constant définit alors la fin d'un essai. Les facteurs de frottement calculés sont similaires aux valeurs initiales. Cette couche superficielle peut donc être à l'origine d'une augmentation, temporaire, de l'adhérence disponible au contact.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

III.2.3 Conséquences de l'activation de débits de recirculations longitudinaux

Les conditions d'essais imposées ont permis de relier les variations globales d'adhérence à la morphologie et aux débits de troisièmes corps. L'objectif de cette section est d'identifier les phénomènes corrélés aux variations "locales" d'adhérence sur un tour de galet. Cela permet de mettre en évidence les évolutions des débits à l'origine des transitions entre les régions n°1 à n°5 le long de la couronne.

L'analyse des mesures couplées aux observations des surfaces des premiers corps met en évidence la notion de déplacement des troisièmes corps externes.

Les feuilles utilisées ont été placées sur une zone spécifique de la couronne. Sous l'effet des passages répétés du contact, elles sont étalées de façon discontinue sur la surface de la couronne. Ce phénomène est aussi retrouvé à l'échelle d'un contact réel, une pollution (au sens ferroviaire du terme, partie I.4.2) organique appliquée sur la table de roulement d'un rail, peut adhérer à la surface des roues d'un train et être redéposée sur des distances pouvant aller jusqu'à la centaine de mètres [41]. Ce phénomène de transport de pollution et d'activation des débits de recirculation longitudinaux est reproduit sur le banc d'essai Triboring.

L'ajout de feuilles sur la zone A du banc (figure III.2) diminue le facteur de frottement au passage du galet. Le suivi de l'évolution de ce paramètre sur l'ensemble du périmètre de la couronne (mesuré angulairement) met en évidence le phénomène de transport de pollution identifié sur un système réel. Ces données sont visibles sur la figure III.7.

La zone d'ajout du troisième corps externe est associée à un facteur de frottement minimal (encadré bleu). Le transport du troisième corps externe (débits de recirculation) est mis en évidence sur la figure III.8. La zone correspondant à l'ajout de feuilles est encadrée en pointillés blancs et correspond dès les premiers cycles à l'obtention d'un facteur de frottement minimum, ce qui délimite la région n°1.

La propagation de ces valeurs associées aux passages des troisièmes corps externes sur la zone de contact est visible sur l'ensemble du périmètre de la couronne, et ce, pendant les 40 premiers cycles. Au cours de ce même nombre de cycles, la reprise de l'adhérence au travers de l'acquisition d'un facteur de frottement supérieur ou égal à ceux mesurés en début d'essais ne s'effectue pas.

Le facteur de frottements maximum mesuré au cours des premiers cycles est obtenu lorsque le troisième corps externe ne s'étale plus sur la surface de la couronne. Cet élément est identifiable à l'aide des zones à iso-facteur de frottement sur la figure III.8.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Ainsi, l'étalement des troisièmes corps externes survenant à l'échelle d'un contact rail-roue réel et correspondant à l'activation des débits de recirculations longitudinaux est reproduit sur le banc d'essai Triboring.

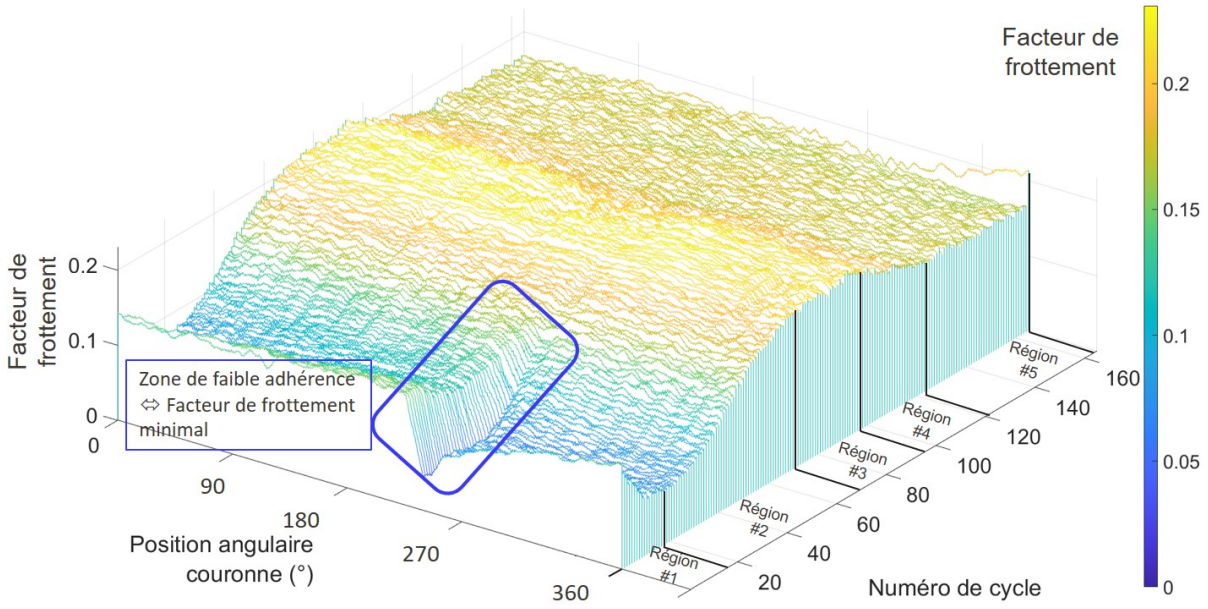


FIGURE III.7 – Variations cyclique du facteur de frottement (taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%).

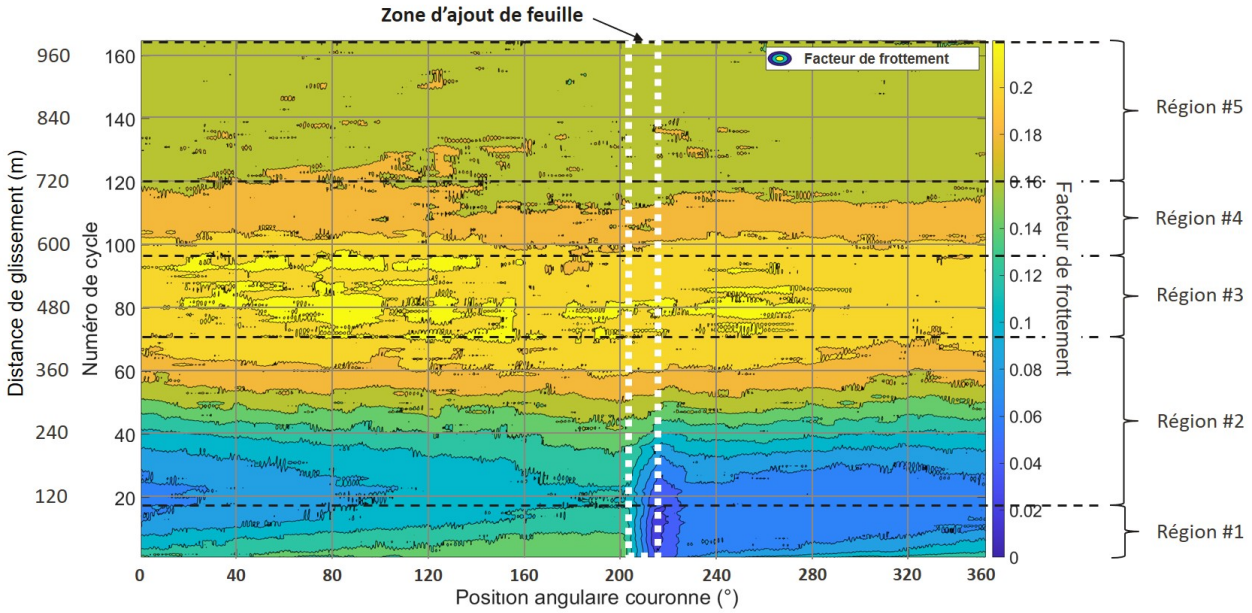


FIGURE III.8 – Variations cycliques du facteur de frottement (taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%), les zones de faible adhérence tendent vers des couleurs foncées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Une synthèse des débits identifiés dans chaque région est visible sur le tableau III.1. Les débits sont évalués qualitativement sur une échelle exprimée « + » dont le nombre est proportionnel à leur importance. « + » signifie très faible et « ++++ » signifie très élevé. Cette description qualitative des débits a été effectuée entre autres par Colas [39] et est reprise ici du fait de sa pertinence.

Débit	Débit source externe	Débit d'éjection	Débit de recirculation	Débit d'usure
Région n°1	++++	+++	+	++
Région n°2	+++	+	+	
Région n°3	+	++	+	+
Région n°4		++++		++++
Région n°5		++		++

Tableau III.1 – Débits qualitatifs identifiés au court d'une série d'essais au travers de l'analyses de vidéos prises (taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%). Seuls les débits sources externes, d'éjection, de recirculation et d'usure ont pu être décrits qualitativement. Lorsqu'une case est vide, le débit associé n'est pas identifiable à cette échelle d'observation.

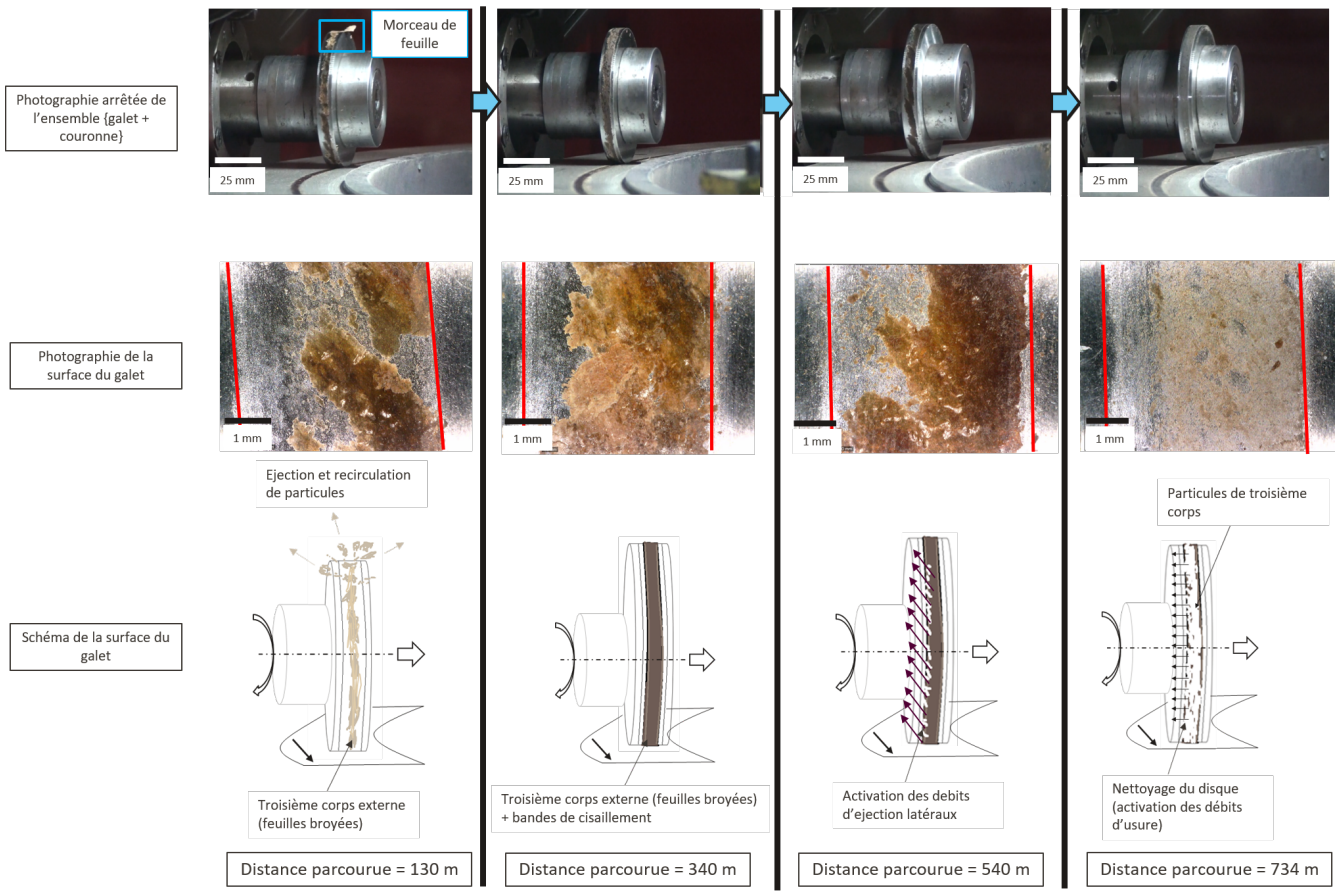


Figure III.9 – Photographies de la surface d'un galet utilisé lors d'un essai arrêté (taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%). Des schémas des galets pour différentes distances parcourues permettent d'illustrer l'activation de débits tribologiques.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Les variations monotones du facteur de frottement ont servi à définir 5 régions pour lesquels plusieurs débits de troisième corps sont identifiés. La lecture de ces données mécaniques peut être complétée par l'utilisation de grandeurs énergétiques, permettant de caractériser l'énergie transmissible par un troisième corps aux premiers. Cette grandeur est reliée à une variation donnée d'adhérence.

III.2.4 Analyses mécaniques énergétiques des variations d'adhérence

III.2.4.1 Étude de la puissance dissipée par frottement

La puissance dissipée par frottement sert à obtenir des informations énergétiques instantanées (partie II.2.3.0.a) en lien avec une variation d'adhérence. Ces données sont visibles sur la figure III.10. L'ajout des variations du facteur de frottement sur cette même figure permet aussi de justifier la validité des calculs de puissance dissipée par frottement. En effet, comme mentionné sur les équations II.3 et II.4, le facteur de frottement et la puissance dissipée par frottement peuvent être directement proportionnels lorsque la vitesse de glissement est constante. La mise en évidence d'évolutions similaires de ces deux grandeurs permet donc de confirmer la validité du calcul de ces données.

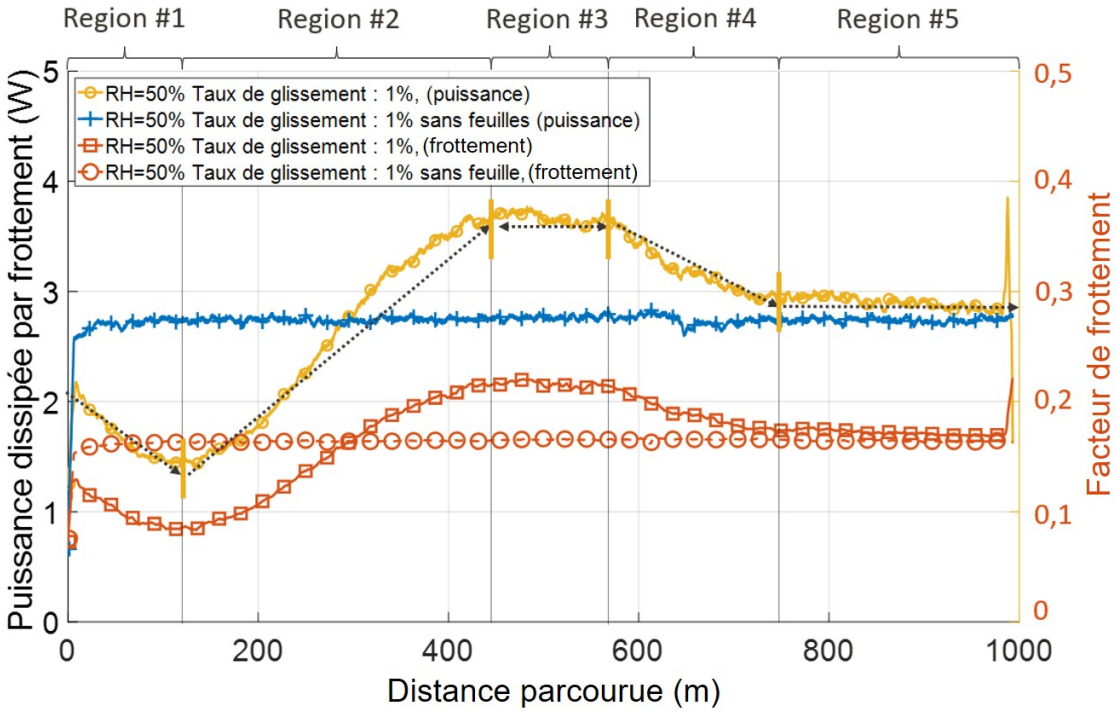


FIGURE III.10 – Variations du facteur de frottement et de la puissance dissipée par frottement, comparaison entre cas d'étude avec et sans présence de troisième corps externe (taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

L'influence de l'ajout d'un troisième corps externe au contact est principalement visible au début et à la fin d'un essai. La figure III.10 permet de compléter la description de l'évolution des débits de troisièmes corps. En effet, pour une distance parcourue inférieure à 150m (transition des régions n°1 et n°2), la diminution de la puissance dissipée par frottement est corrélée à une activation des débits source externe, d'éjection et de recirculation des troisièmes corps (figure III.11

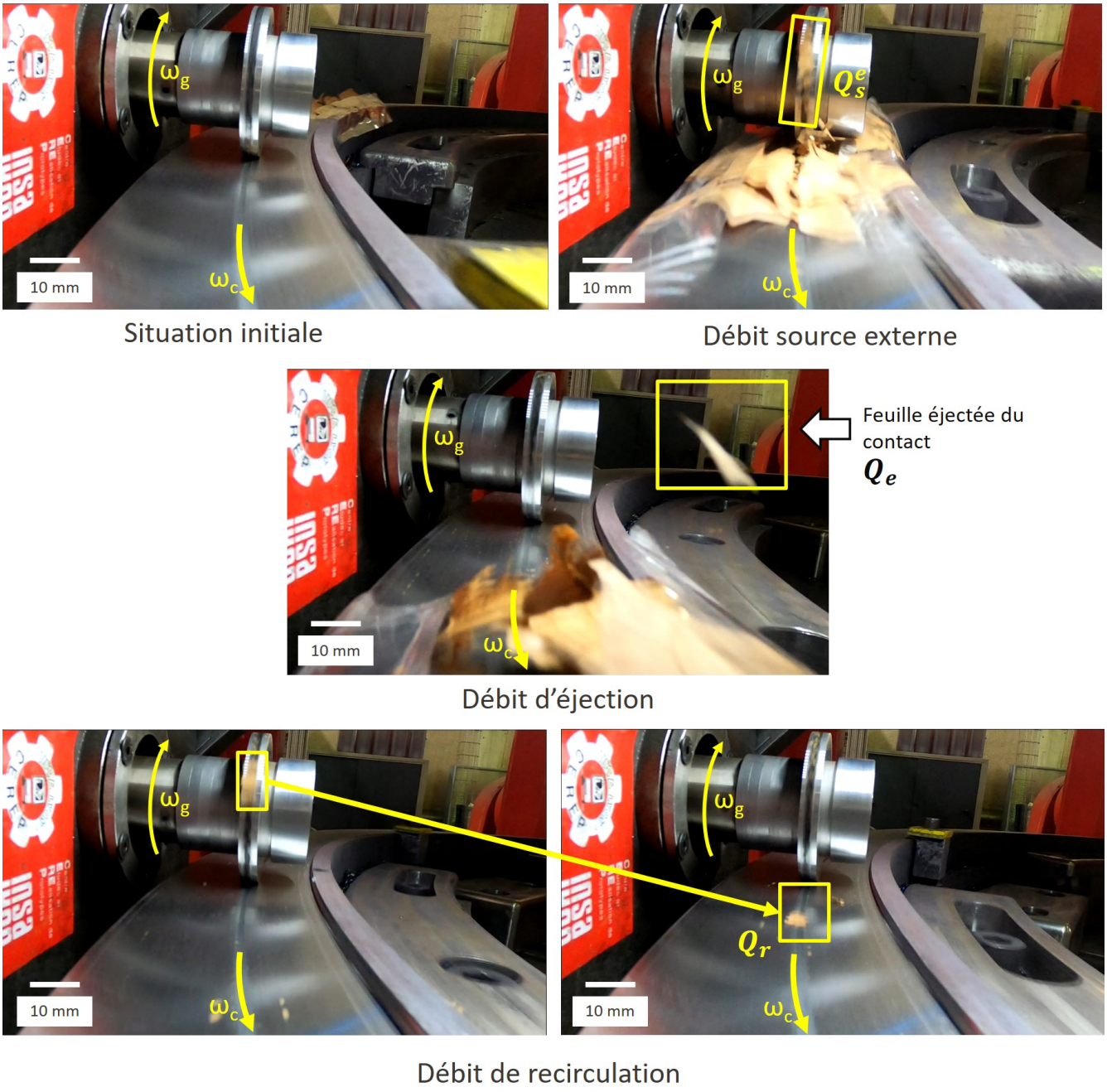


FIGURE III.11 – Mise en évidence des débits de troisièmes corps associés à la transition entre les régions n°1 et n°2.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Les variations de puissances associées à la région n°2 sont principalement liées à une diminution des débits d'usure du troisième corps. La couche organique formée par la recirculation du troisième corps tend à occuper une grande partie de la largeur de la surface de contact du galet (figure III.9, distance parcourue de 340m).

La région n°3 peut être reliée au démarrage d'un nettoyage mécanique du galet qui se poursuit et peut évoluer au cours des régions n°4 et n°5. L'activation des débits associés à ce phénomène est corrélée à l'obtention d'une asymptote de puissance. **La puissance calculée en présence d'un troisième corps externe initial tend vers celle obtenue à partir d'un essai réalisé sans troisième corps externe**. Cela confirme l'hypothèse d'un nettoyage du contact.

L'analyse de la puissance dissipée par frottement ne permet d'obtenir d'informations qu'à un instant donné. La généralisation de l'apport énergétique macroscopique de l'adhérence au contact, peut être réalisée grâce au calcul de l'énergie dissipée par frottement.

III.2.4.2 Etude de l'énergie dissipée par frottement

III.2.4.2.a Définition de seuils énergétiques

L'énergie dissipée par frottement correspond à celle transmissible par le troisième corps présent au sein du contact (partie II.2.3) pour des variations données d'adhérence. Ainsi, le tracé de cette grandeur en fonction du facteur de frottement apporte des informations supplémentaires permettant de caractériser l'influence de l'ajout de feuilles au contact sur les variations d'adhérence. Dans le cas d'un essai réalisé avec un taux de glissement de 1%, ces données sont tracées sur la figure III.12.

Sans troisième corps externe, l'énergie dissipée par frottement augmente (logiquement) proportionnellement au nombre de cycle réalisés (sous conditions d'essais constantes). Ces variations sont synonymes d'un facteur de frottement constant. Il est aussi intéressant de noter que les conditions d'essais imposées en l'absence de feuilles ne permettent pas dans notre cas de dépasser un facteur de frottement [1] de $0.16 \pm 15\%$. En présence de feuilles, l'utilisation de l'énergie dissipée permet d'associer une quantité d'énergie transmissible par un troisième corps aux premiers pour une valeur de facteur de frottement.

Les régions au cours desquelles le facteur de frottement varie de façon monotone (partie III.2.1)

1. L'augmentation du taux de glissement vers des valeurs supérieures à 2% (limite d'activation des anti-enrayeurs sur trains [26]) est à l'origine de phénomènes d'usure du galet en acier ER7 utilisé sur le banc d'essai Triboring. Cette usure modifie la géométrie du galet, la pression au contact, les efforts tangents et normaux mesurés et par conséquent le facteur de frottement. Ce dernier n'est plus constant mais évolue de façon linéaire. Ce phénomène est explicité au cours du chapitre 4.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

servent à définir 4 seuils énergétiques. Ces seuils correspondent principalement aux limites des régions. Ils permettent de quantifier l'énergie associée à un facteur de frottement minimal (seuil n°1, limite des régions n°1 et n°2), égal à celui mesuré en l'absence de feuilles (seuil n°2), maximum mais transitoire (seuil n°3, limite région n°2 et n°3) et stabilisé (seuil n°4, limite région n°4 et n°5). Pour un taux de glissement égal à 1% et une hygrométrie relative de 50%, ces valeurs sont explicitées sur la figure III.13.

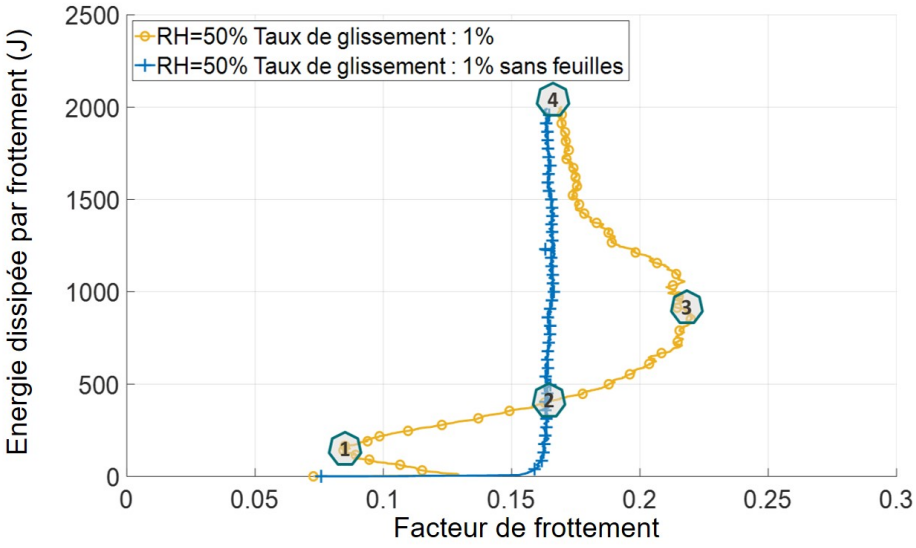


FIGURE III.12 – Variations d'énergie dissipée par frottement en fonction du facteur de frottement, comparaison entre cas d'étude avec et sans présence de troisième corps externe (taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%).

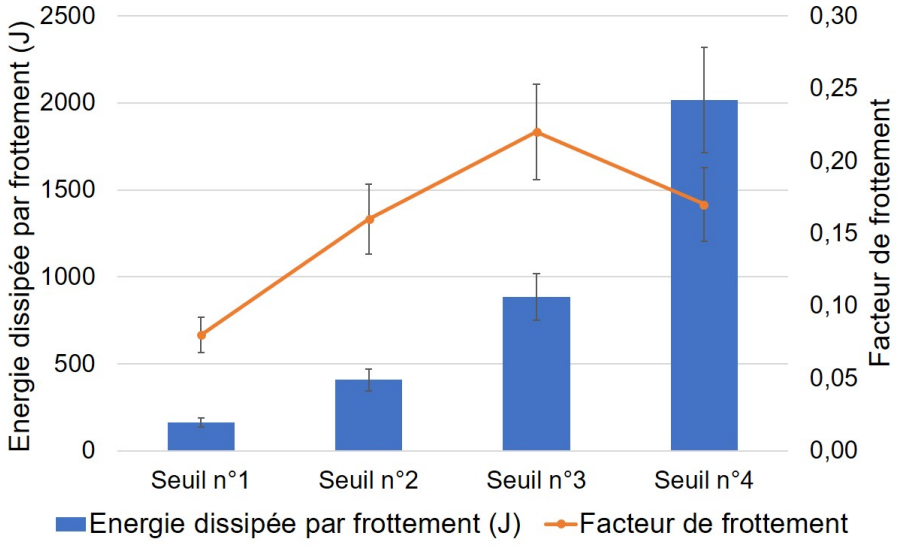


FIGURE III.13 – Seuils d'énergie dissipée par frottement pour atteindre un facteur de frottement minimal (seuil n°1), égal à celui mesuré en l'absence de feuilles (seuil n°2), maximum (seuil n°3) et stabilisé (seuil n°4).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

III.2.4.2.b Description des seuils énergétiques identifiés

Seuil n°1 : frottement minimum

Le facteur de frottement mesuré au niveau du seuil n°1 est de l'ordre de 0.08 soit environ deux fois inférieur aux valeurs communes (0.20-0.30) utilisées classiquement pour le contact rail-roue [104]. Les variations de cette grandeur s'effectuent quasi-linéairement entre les seuils 1 et 2 (figure III.14). Cette augmentation linéaire traduit un apport d'énergie dissipée par frottement (équation II.3) constant.

Le tracé séparé des grandeurs d'efforts tangentiels, de la vitesse de glissement, et de la puissance dissipée par frottement est visible sur la figure III.15. La lecture de ces données met en évidence l'influence majoritaire des variations des grandeurs d'efforts sur les variations de puissance et d'énergie dissipée. Cela est justifié par la mesure d'amplitude des données d'efforts supérieure (d'un facteur 600) à celle de la vitesse de glissement. Ce résultat est cohérent avec un asservissement en vitesse de glissement réalisé sur Triboring.
L'analyse de ces données découplées utilisées pour le tracé des grandeurs énergétiques permet ainsi d'affirmer qu'une évolution linéaire de l'énergie dissipée par frottement, est synonyme d'une mobilisation linéaire de l'effort tangent au travers des troisièmes corps formés au contact. Les variations de cet effort sont utilisées pour définir l'adhérence d'un contact rail-roue, cette notion est reprise en partie II.2.3.

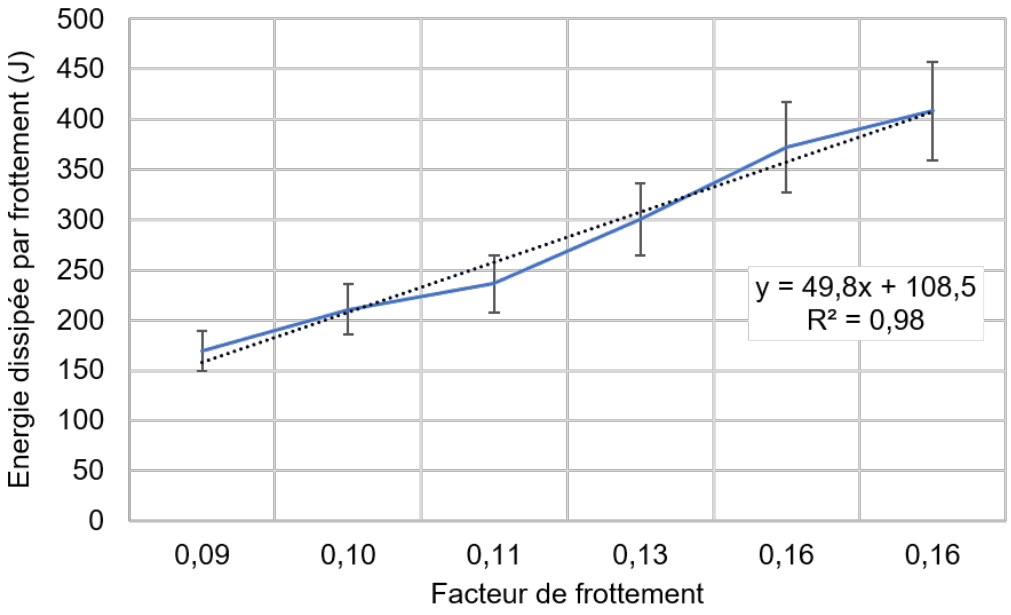


FIGURE III.14 – Mise en évidence du caractère linéaire de l'évolution du facteur de frottement en fonction de l'énergie dissipée par frottement entre les seuils n°1 et n°2 (taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

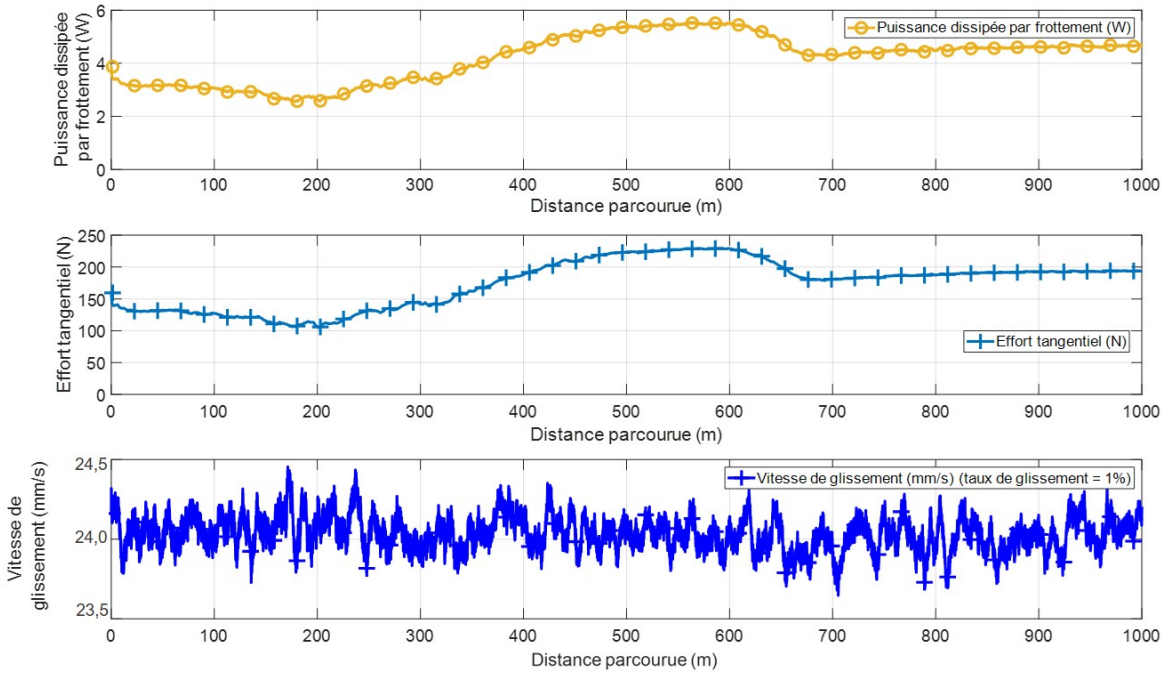


FIGURE III.15 – Puissance dissipée par frottement associée à l'effort tangentiel et la vitesse de glissement. (taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%). Les trois grandeurs tracées font l'objet d'une moyenne mobile sur une durée d'un tour de couronne.**Les échelles sont choisies afin de pouvoir mettre en évidence l'amplitude des différentes grandeurs tracées**.

Seuil n°2 : frottement identique avec et sans présence de feuilles

Pour les conditions d'essais appliquées dans ce chapitre, l'énergie dissipée par frottement (équivalente à celle transmissible par le troisième corps aux premiers) nécessaire pour passer du seuil n°1 au seuil n°2 est environ deux fois inférieure à celle liée à la transition entre le seuil n°2 et le seuil n°3. Ce résultat permet de mettre en évidence deux transmissions d'énergies différentes pour un même facteur de frottement avec et sans feuilles. Cela est visible grâce à l'intersection des courbes énergétiques. Dans le cas d'un essai sans feuilles, le facteur de frottement est quasiment stable et obtenu pour une faible valeur d'énergie. Dans le cas d'un essai avec feuilles, l'énergie transmissible pour atteindre un facteur de frottement supérieur ou égal à celui d'un essai sans feuilles est alors supérieure. Ce seuil peut donc servir à identifier les conditions d'essais permettant d'optimiser l'énergie transmissible par un troisième corps dans le but de retrouver un facteur de frottement nominal.

Seuil n°3 : frottement maximum

La détermination d'un facteur de frottement maximal relié au seuil numéro 3 correspond à un accroissement des débits d'éjection du troisième corps. La valeur d'énergie associée à ce seuil

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

permet de caractériser la quantité d'énergie maximale transmissible par un troisième corps dans le but de maximiser l'adhérence. Cet optimum n'est que transitoire. Il peut néanmoins être considéré comme un seuil d'énergie associé à une adhérence latente maximale obtenue par sollicitation en glissement du troisième corps.

Seuil n°4 : frottement stabilisé

Le seuil numéro 4 est particulièrement intéressant pour quantifier l'énergie minimale transmissible au travers d'un troisième corps pour revenir à une situation d'adhérence nominale pérenne (sans feuille). Il est associé à une reprise d'adhérence. Ici, l'énergie dissipée correspondant à ce seuil est de l'ordre de 2000J.

Ces seuils sont définis à partir des limites entre plusieurs régions. Ces limites servent à mettre en évidence des extrema d'adhérence correspondants à plusieurs états physico-chimiques du troisième corps.
Ainsi, l'analyse de la morphologie des troisièmes corps et de leurs compositions chimiques pour un état initial (avant essai), et lors de la mesure d'un minimum (seuil n°1) et d'un maximum d'adhérence (seuil n°3) apportera de nouveaux éléments de lecture.

Remarque : Dans le chapitre IV, les seuils n°2 et n°4 seront utilisés pour la réalisation d'une étude paramétrique car ils permettront d'expliciter des conditions associées à une reprise d'adhérence temporaire puis définitive pour différentes conditions d'essais. Pris individuellement, leurs analyses n'apportent pas d'éléments supplémentaires autres que ceux donnés jusqu'ici.

III.2.4.3 Analyses physico-chimiques des troisièmes corps externes

III.2.4.3.a Analyses physico-chimiques associées à un minimum d'adhérence (seuil n°1)

Observations en microscopie optique et électronique

Les troisièmes corps formés au seuil n°1 sont prélevés en surface des galets observés en microscopie optique puis électronique à balayage (figure III.16). Pour rappel, l'utilisation du détecteur d'électrons rétrodiffusés en imagerie électronique permet de mettre en évidence des différences de contrastes basées sur la différence du numéro atomique des espèces chimiques caractéristiques de la surface observée. Une tension d'accélération comprise entre 10 et 20kV, ainsi qu'un vide partiel sont utilisés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

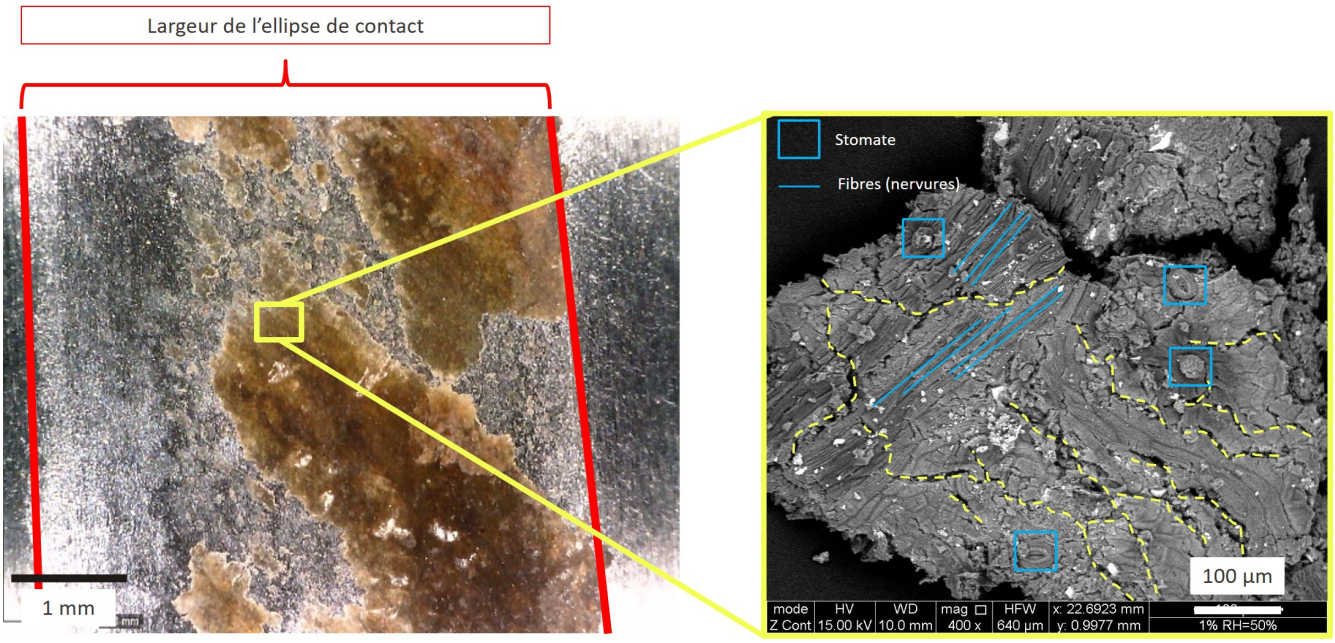


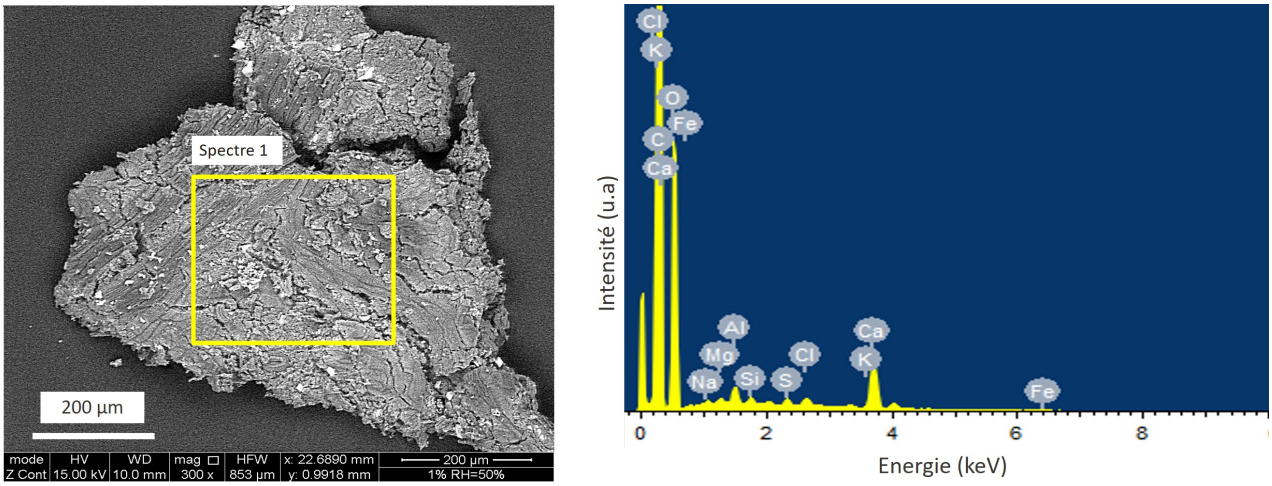
FIGURE III.16 – Observations en microscopie optique et électronique (MEB (mode vide partiel, 15kV, détecteur BSE en mode contraste atomique) d'un échantillon de troisième corps prélevé au seuil n°1 (taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%). Les traits pointillés verts délimitent plusieurs fissures observées.

Ces observations (figure III.16) révèlent la présence d'éléments constitutifs de la paroi végétale d'une feuille (stomates et fibres). Le troisième corps formé est rompu au travers d'une multitude de fissures pouvant être dues à un asséchement des feuilles. L'adhesion de ce troisième corps au premier, associée aux fissures observées, peuvent aussi expliquer la génération d'une couche de troisième corps sur l'ensemble de la zone de contact. Le troisième corps adhère à la surface du galet lors des premiers cycles, se fissure ensuite pour générer de nouvelles zones sur lequel d'autres particules de troisième corps pourront adhérer à la surface du galet.

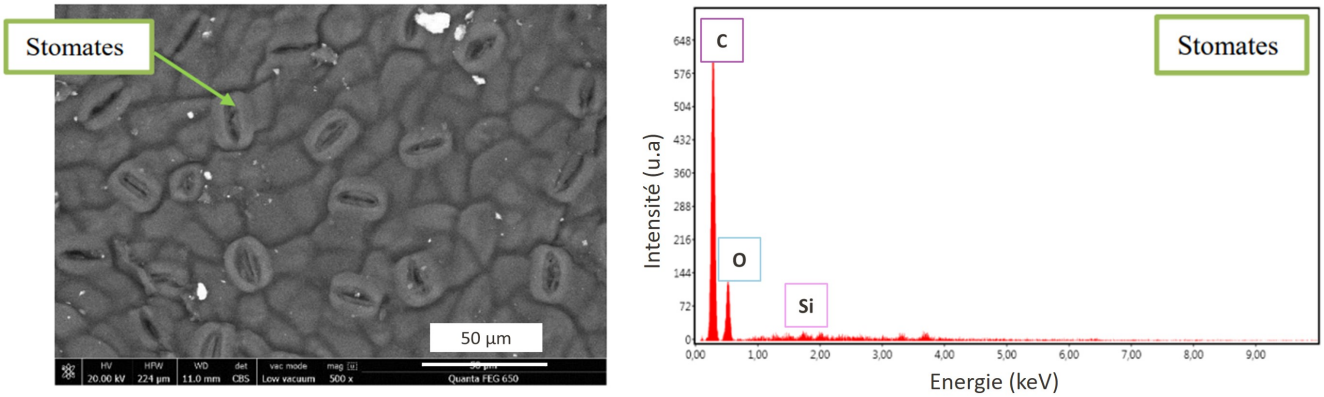
La réalisation d'analyse spectroscopique par EDX (figure III.17a) révèle la présence d'éléments organiques issus de la biomasse utilisée : carbone, oxygène, calcium, azote. Du fer et de l'aluminium sont aussi retrouvés dans l'échantillon. Ils peuvent être synonymes d'un apport d'éléments issus de l'un des premiers corps. Un spectre MEB-EDX d'un échantillon de feuille n'étant pas passé dans un contact réel mais prélevé depuis la surface d'un rail est visible sur la figure III.17b à des fins de comparaison.
Le spectre EDX de cet échantillon ne révèle que la présence d'oxygène, de carbone, et de silicium (pouvant être relié à l'ajout de sable par les trains lors d'incidents d'adhérence dégradée). À titre de comparaison, des analyses MEB-EDX d'échantillons de troisième corps prélevés après passage d'un train sur une zone polluée sont visibles sur la figure II.33. Elles permettent de mettre en évidence la présence d'un troisième corps compact et cohésif sur lequel plusieurs fissures sont visibles. La présence de fronts de fissures est synonyme d'un mode d'accommodation de type M2 (rupture)

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

pouvant expliquer les mécanismes de création de la couche organique retrouvée lors des premiers cycles.



(a)



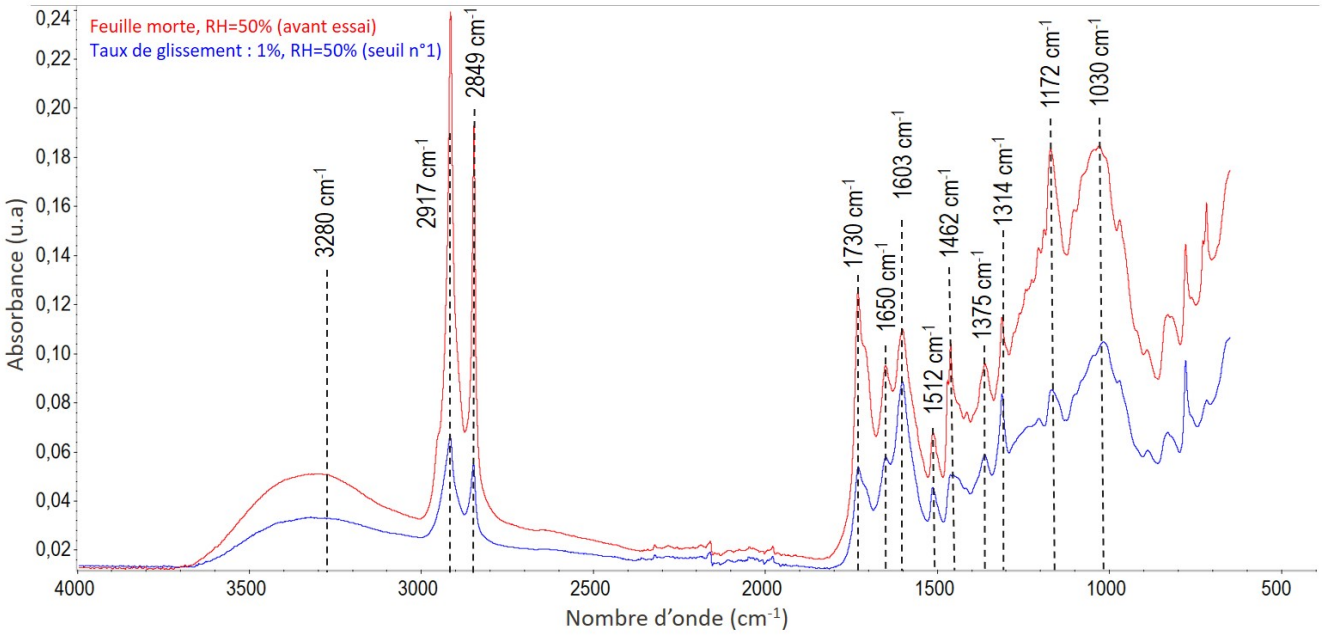
(b)

FIGURE III.17 – a) Observation MEB-EDX d'un échantillon de troisième corps prélevé à la suite d'un essai (taux de glissement : 1%, RH=50%) arrêté au seuil 1 (minimum de frottement) (15 kV, détecteur BSE, contraste atomique, vide partiel) b) Observation MEB-EDX d'un morceau de feuille prélevé en voie non passé dans le contact(20 kV, détecteur SE, vide partiel).

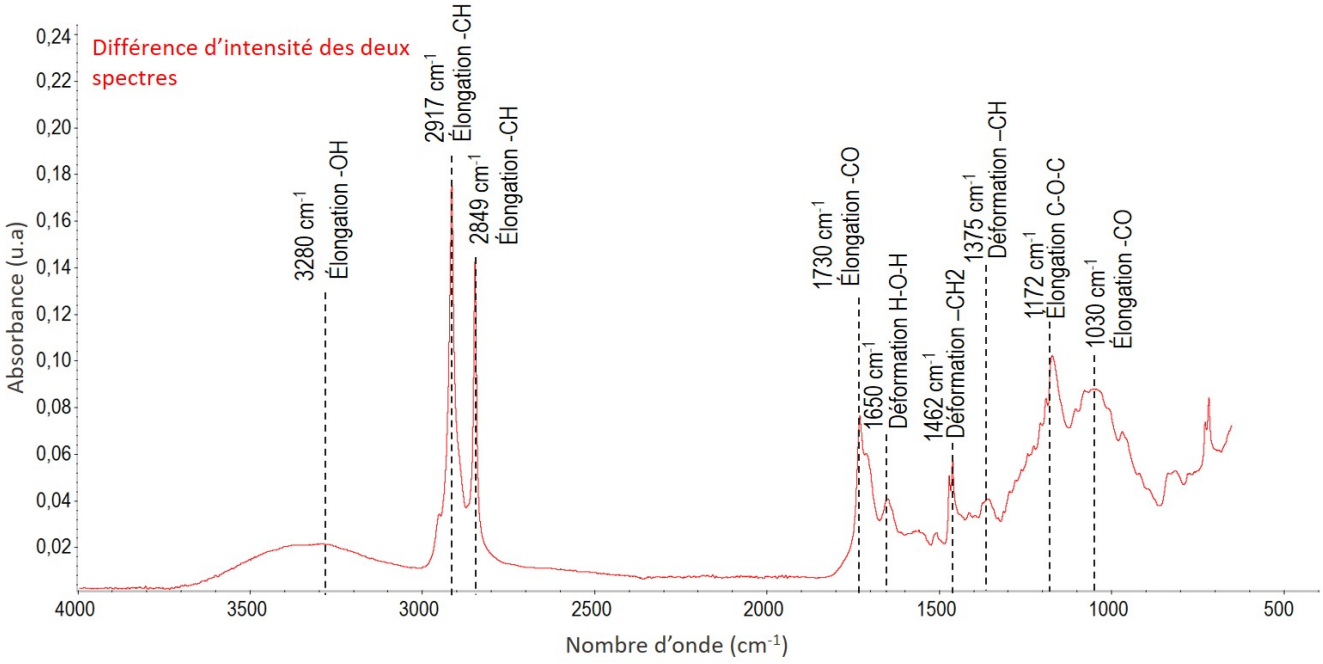
Analyses infrarouges

La connaissance des principales macromolécules composant les biomasses étudiées (cellulose, hémicellulose et lignine, partie I.4.2.3) permet d'identifier les différentes liaisons chimiques liées aux réactions physico-chimiques mises en évidence par Ishizaka [56] et Bringel [54]. L'analyse par spectroscopie infrarouge des troisièmes corps externes avant leurs passages dans le contact et au minimum d'adhérence (seuil n°1) sont présentés sur la figure III.18a.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)

FIGURE III.18 – a) Spectres IR de deux troisièmes corps externes pour une hygrométrie relative de 50%). En rouge, spectre d'une feuille non introduite au contact. En bleu, échantillon prélevé lors de l'obtention d'un facteur de frottement minimum (seuil n°1). b) Différence des deux spectres.

Ces spectres font apparaître des bandes d'absorptions retrouvées pour des nombres d'ondes similaires sur une majorité de la gamme de mesure. La réalisation d'analyses semi-quantitatives

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

est alors possible. En effet, la comparaison de plusieurs spectres peut s'effectuer à partir d'une mise à l'échelle normée par rapport à l'intensité maximale des bandes observées. Ainsi, pour un même nombre d'onde, une modification de l'intensité d'une bande est synonyme de dégradation ou d'activation d'une liaison.

La liste des bandes d'absorptions des deux spectres IR visibles sur la figure III.18 est donnée sur la figure III.19. Il est possible de noter qu'une grande majorité des bandes d'absorptions sont retrouvées pour des nombres d'ondes proches (moins de 10% de différence) de ceux donnés lors de l'étude bibliographique.

Cette méthode d'analyse ne permet pas d'associer directement une liaison chimique à une molécule. Toutefois, les résultats des travaux effectués par Letellier et Fleurent-Didier [127] complètent la liste d'attribution donnée précédemment (figure III.19). Ainsi, les bandes suivantes peuvent, selon ces travaux, être reliées à différentes macromolécules :

- 1650 cm^{-1} : vibrations de déformations liées à une molécule d'eau.
- 1425 cm^{-1} : vibrations associées des liaisons -CH2 et -CH3 (lignines).
- 1370 cm^{-1} : vibrations de déformations des liaisons -CH (hémicelluloses et celluloses) et vibrations de déformations symétriques des liaisons -CH3 (lignines).
- 1270 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CO (lignines et mannanes).
- 1230 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CO (lignines).

L'ensemble des bandes d'absorption obtenues expérimentalement sur ces deux échantillons correspondent aux résultats d'analyses bibliographiques donnés (partie I.4.2.3). Elles sont donc cohérentes et peuvent être utilisées pour la suite de ces travaux.

À une moindre échelle, certaines bandes ont une intensité plus faible que celles obtenues pour un échantillon de feuille (RH=50%) non introduit au contact. La superposition des deux spectres présentés et le tracé de leurs différences est visible sur la figure III.18b.

L'ensemble du spectre d'absorption IR de l'échantillon de feuille morte avant essai est supérieur (en intensité) à celui du spectre IR associé au troisième corps prélevé au seuil n°1. La présence d'un taux de glissement égal à 1% peut être synonyme d'une dégradation de la quasi-majorité des liaisons chimiques pouvant être analysées par spectroscopie IR. L'obtention d'un facteur de frottement minimal est donc associée à une dégradation physico-chimique et mécanique des troisièmes corps externes introduits en début d'essai.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

De façon plus spécifique, l'étude du troisième corps prélevé au seuil n°1 révèle la présence de bandes d'absorption dont l'intensité est notablement inférieure (différence d'intensité de l'ordre de 30%) aux échantillons de référence (feuille morte avant essai, RH=50%). Les nombres d'ondes correspondants à ces bandes sont égales à :

- 3280 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -OH,
- 2917 et 2849 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CH,
- 1730 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CO (après oxydation),
- 1650 cm^{-1} : vibrations de déformations des liaisons (H-O-H),
- 1462 cm^{-1} : vibrations de déformations des liaisons -CH2,
- 1375 cm^{-1} : vibrations de déformations des liaisons -CH,
- 1172 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons C-O-C,
- 1030 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CO.

Parmi l'ensemble des bandes d'absorption relevées, celles dont les nombres d'ondes sont égaux à 3280 cm^{-1}, 1730 cm^{-1} et 1172 cm^{-1} apportent des éléments corrélés aux couplages mécaniques et physico-chimiques potentiellement rencontrés lors des essais :

La bande identifiée à 3280 cm^{-1} peut être associée selon Cichosz et Masek à des vibrations d'élongations [122] de liaisons hydrogènes. Selon ces auteurs, l'augmentation de l'intensité de cette bande est reliée au développement de liaisons hydrogènes inter et intramoléculaires pour la macromolécule de cellulose (et d'hémicellulose). Ces liaisons modifient la raideur de ces composés.
La bande identifiée à 1730 cm^{-1} peut être associée selon Socrates [121] à des vibrations d'élongations de liaison -CO après oxydation. Ce type de liaison a pu être retrouvé après analyse IR d'une molécule de cellulose (aussi mentionné en partie II.2.3).
La bande identifiée à 1172 cm^{-1} correspond à des vibrations d'élongations d'une liaison C-O-C (explicité par Oh [131]) présente dans une molécule de glucose. La diminution de l'intensité de cette bande traduit selon [132] la potentielle dégradation des régions cristallines des molécules de cellulose.
Les variations d'intensité des trois bandes reprises dans ce paragraphe sont utilisées pour expliciter l'occurrence de modifications physico-chimiques survenues au cours d'un essai dans un troisième corps analysé.

Les analyses IR réalisées permettent aussi de mettre en évidence une bande d'absorption liée à des vibrations de déformations de liaison H-O-H pour un nombre d'onde de 1640 cm^{-1} [122][131]. Cette bande peut traduire la capacité d'une molécule organique à absorber une certaine quantité d'eau. Pour les deux spectres IR visibles sur la figure III.18b, une différence d'intensité de l'ordre de 30% est obtenue à une longueur d'onde égale à 1650 cm^{-1} pour les deux échantillons analysés. Pour les conditions d'essais suivies au cours de ce chapitre, un taux de glissement égal à 1% peut

Nombre d'onde mesuré cm^{-1}	3280	2917 2849	1730	1706	1650	1603	1594	1512
[Nombres d'ondes mesurés] Références bibliographiques	[3000-3400]	2870/2960	[1725-1750]	[1680-1730]	[1640]	[1600-1635]	[1580-1605]	[1504-1510]
Type de vibration et/ou liaison associée	Vibrations d'élongations liaisons -OH	Vibrations d'élongations liaisons -CH2/-CH	Vibrations d'élongations liaisons -CO (après oxydation)	Vibrations d'élongations liaisons -CO	Vibrations de déformations (H-O-H)	Vibrations de déformations liaisons -OH	Vibrations d'élongations liaisons C=C pour des cycles aromatiques	Vibrations d'élongations liaisons C=C pour des cycles aromatiques
Molécule potentielle dont la liaison réagit	Cellulose, lignine, hemicellulose	Cellulose, lignine, hemicellulose	Cellulose, lignine, hemicellulose	C2O42- ion oxalate	Cellulose, lignine, hemicellulose, eau libre	Cellulose, lignine, hemicellulose	Lignine, hémicellulose	Lignine, hémicellulose
Feuille morte RH=50%	x	x	x	x	x	x	x	x
Prélèvement RH=50%, taux de glissement : 1%	x	x	x	x	x	x	x	x

Nombre d'onde mesuré cm^{-1}	1462	1416	1375	1314	1235/1208	1166/1172	1100	1030
[Nombres d'ondes mesurés] Références bibliographiques	[1435-1480]	[1420-1425]	[1370-1375]	[1310-1410]	[1230-1270]	[1170]	[1105]	[1030]
Type de vibration et/ou liaison associée	Vibrations de déformations liaisons -CH2	Vibrations de déformations (cisaillement) liaisons -CH2 et -CH3 OU Vibrations d'un groupement carboxyle	Vibrations de déformations Liaisons C-H et de déformations symétriques des liaisons -CH3	Combinaison d'une vibration de déformation d'une liaison O-H et de la vibration d'élongation d'une liaison C-O	Vibrations d'élongations liaison C-O	Vibrations d'élongations liaisons C-O-C (lien B-glycosidique)	Vibrations d'élongations des liaisons -CO et - OH	Vibrations d'élongations liaisons -CO
Molécule potentielle dont la liaison réagit	Cellulose, lignine, hemicellulose	Cellulose, lignine, hemicellulose, pectine	Cellulose, lignine, hemicellulose	Cellulose, lignine (phénols), hemicellulose	Lignine et hémicellulose	Cellulose, lignine, hemicellulose	Cellulose, lignine, hemicellulose	Cellulose, lignine, hemicellulose
Feuille morte RH=50%	x	x	x	x	x	x	x (faible intensité)	x
Prélèvement RH=50%, taux de glissement : 1%	x	(faible intensité) x	x	x	(faible intensité) x	x	(faible intensité) x	x

FIGURE III.19 – Tableau associé à l'identification des différents pics d'absorption IR (essai à taux de glissement 1%, hygrométrie relative : 50%) pour un troisième corps prélevé avant et après essai (seuils n°1 et n°2). Les références utilisées sont issues de [54, 121, 122, 128, 129, 127, 130, 131].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

donc être synonyme d'une absorption et/ou d'évacuation par action mécanique d'eau par l'une des molécules organiques. L'observation d'un échantillon de troisième corps externe prélevé et analysé par MEB-EDX (figure III.17) révèle la présence de fissures. Ces analyses peuvent être complétées à l'aide d'observations effectuées par MEB-BSE sur la figure III.20 (tension d'accélération 15 kV, détecteur d'électrons rétrodiffusés, mode contraste atomique, vide partiel). Elles permettent de mettre en évidence de nouveaux changements de morphologie du troisième corps liés à un facteur de frottement minimum.

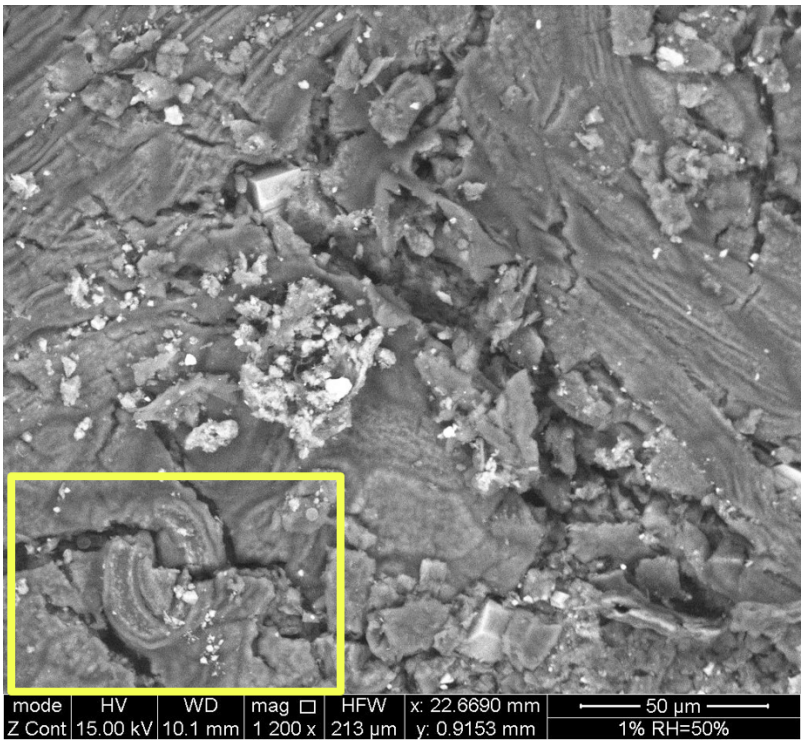


FIGURE III.20 – Observation MEB-BSE d'un échantillon de troisième corps prélevé au cours d'un essai à taux de glissement égal à 1% et une hygrométrie relative de 50%. Encadré jaune, un stomate fissuré est mis en évidence.

Les fissures observées sur cet échantillon sont à relier à la diminution de l'intensité de la bande traduisant la quantité d'eau libre absorbée par le troisième corps et/ou éjectée du contact. Cette bande peut ainsi être utilisée comme indicateur qualitatif décrivant l'évolution de la quantité d'eau dans les troisièmes corps formés.

En somme, les analyses infrarouges réalisées dans cette partie servent à identifier les effets de l'application d'un taux de glissement sur les transformations physico-chimiques subies par le troisième corps. Ainsi, les méthodes d'analyses utilisées ont pu servir à expliciter des couplages mécaniques et physico-chimiques liés à l'obtention d'un facteur de frottement minimum (seuil n°1). Ces outils et méthodes sont de nouveaux appliqués à l'étude d'un échantillon de troisième corps prélevé lors de l'obtention d'un facteur de frottement maximum (seuil n°3).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

III.2.4.3.b Analyses physico-chimiques associées à l'obtention d'un maximum d'adhérence (seuil n°3)

Observations en microscopie optique et électronique

Les variations d'énergies transmissibles par le troisième corps jusqu'au seuil n°3 sont liées au taux de glissement imposé. Ce dernier engendre des variations locales d'efforts tangents associées à un cisaillement des interfaces. Il peut être visible au cours d'observations de la surface des galets par microscopie optique (figure III.21)

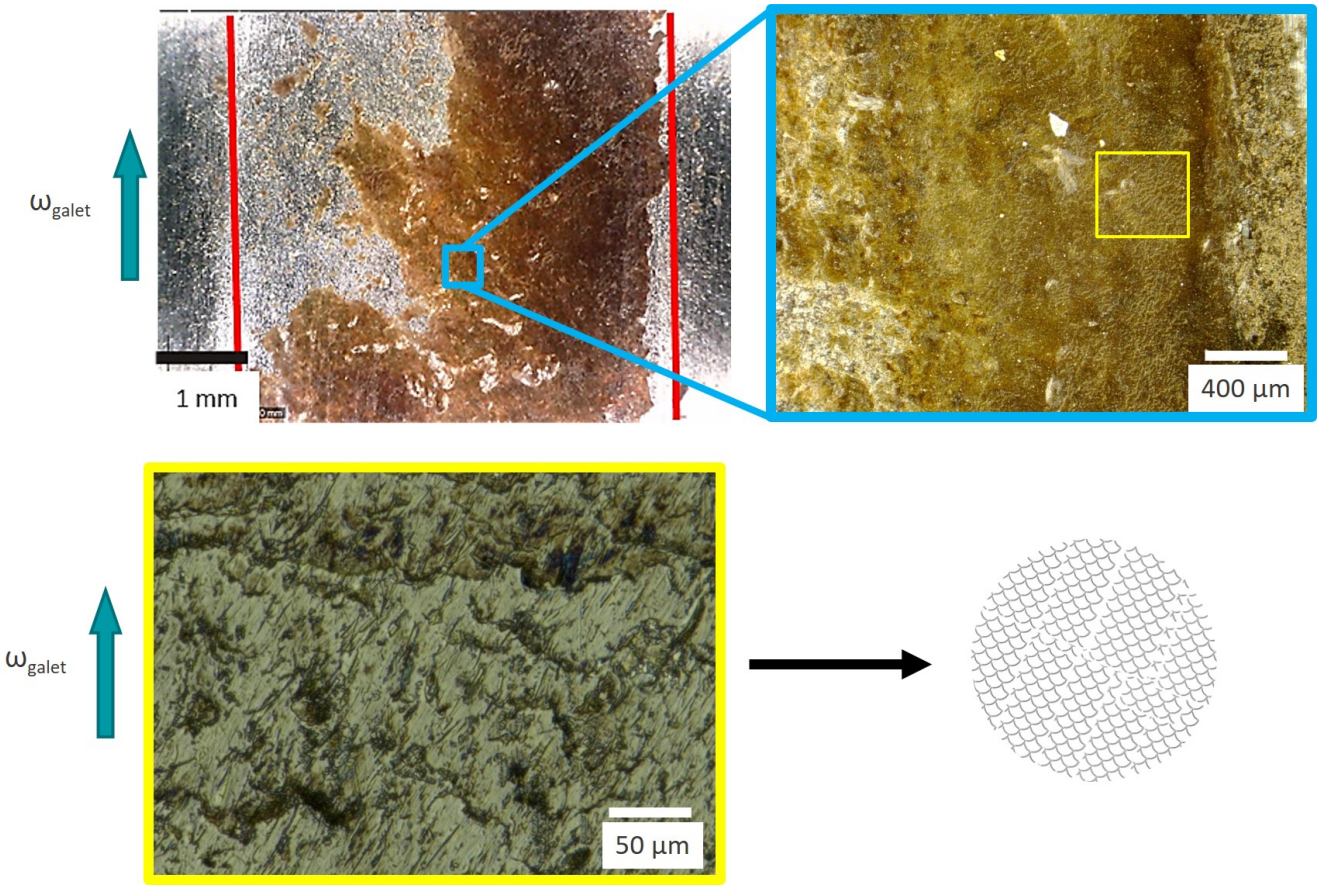


FIGURE III.21 – Mise en évidence de la présence de bandes de cisaillement en surface des galets utilisés pour le seuil n°3 (taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%).

Un échantillon de troisième corps prélevé au seuil n°3 (figure III.21), est observé par MEB (vide partiel, tension d'accélération : 15kV, détecteur BSE en mode contraste atomique) et analysés par EDX. Les éléments associés sont visibles sur la figure III.22. La morphologie des troisièmes corps observés ne laisse plus apparaître, à cette échelle d'observation, la présence de stomates ou plus généralement de fibres issues des parois ligno-cellulosiques des feuilles utilisées. Le mode d'accommodation de type M2 (rupture) n'est plus observable (absence de fissure dans le troisième corps).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Ce troisième corps est constitué de particules de tailles variables (5-30 μm) qui sont agglomérées. Leur présence ne permet cependant pas de conclure sur les modes d'accommodation des vitesses prédominants dans le cas où le facteur de frottement est maximal (seuil n°3).

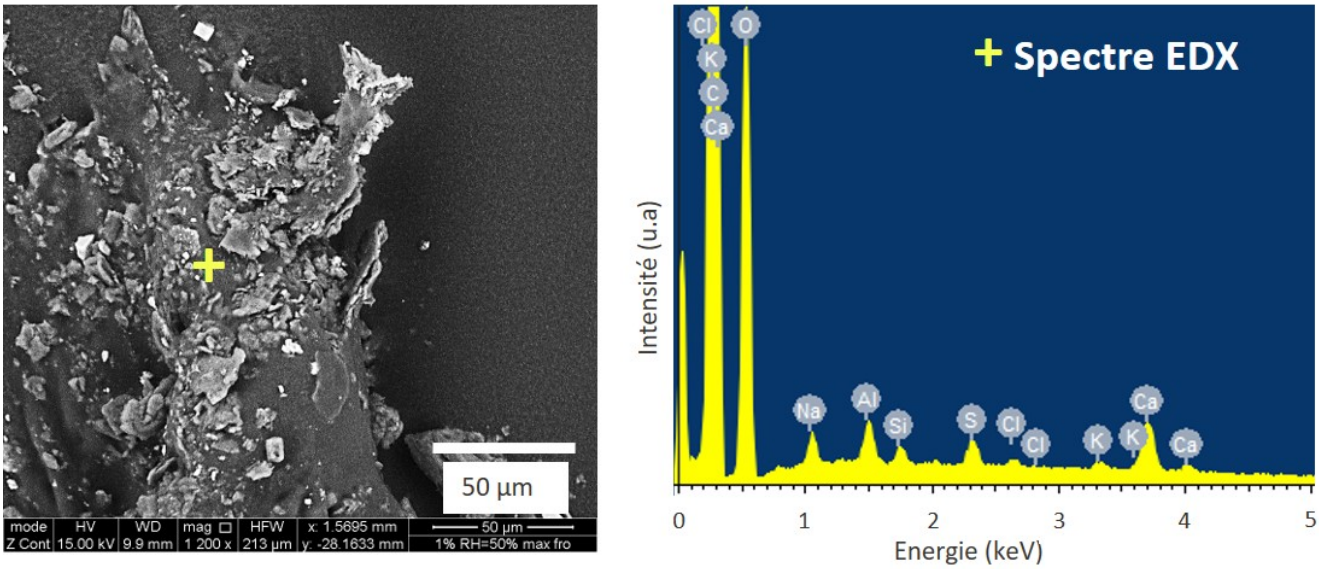


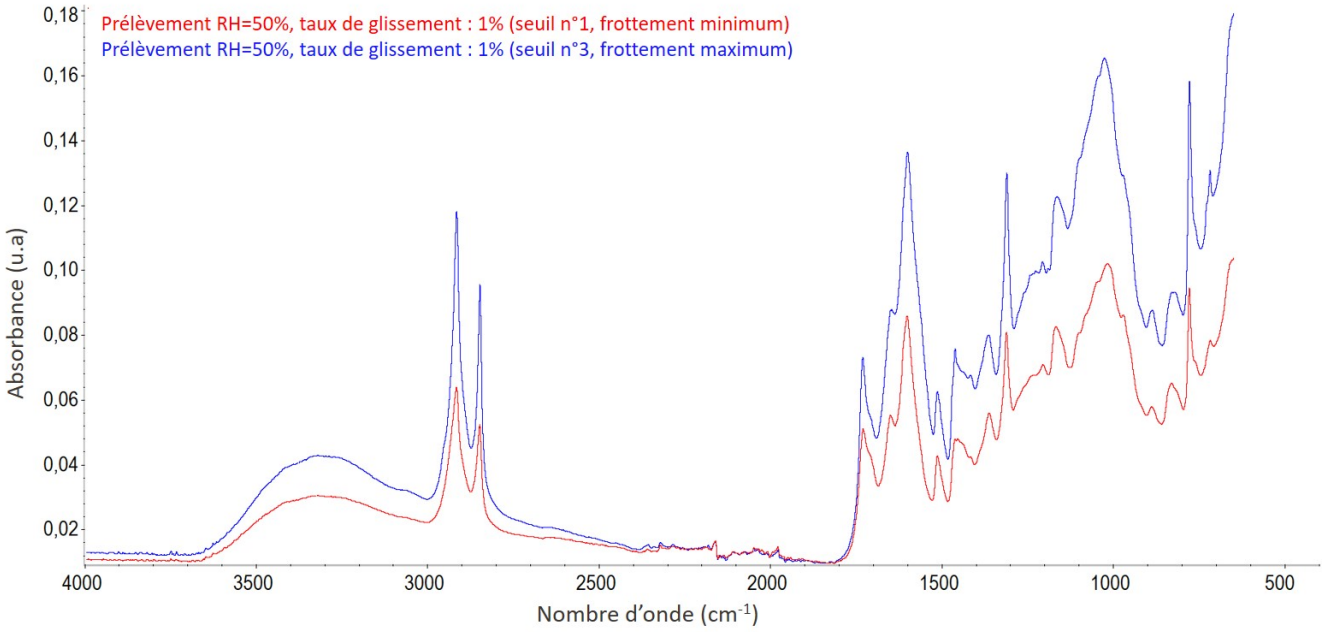
FIGURE III.22 – Observation MEB-BSE-EDX d'un échantillon de troisième corps prélevé au cours d'un essai à taux de glissement égal à 1% et une hygrométrie relative de 50% correspondant au maximum de frottement obtenu. La croix verte correspond à la zone sur laquelle une analyse EDX a pu être réalisée.

Analyses infrarouges

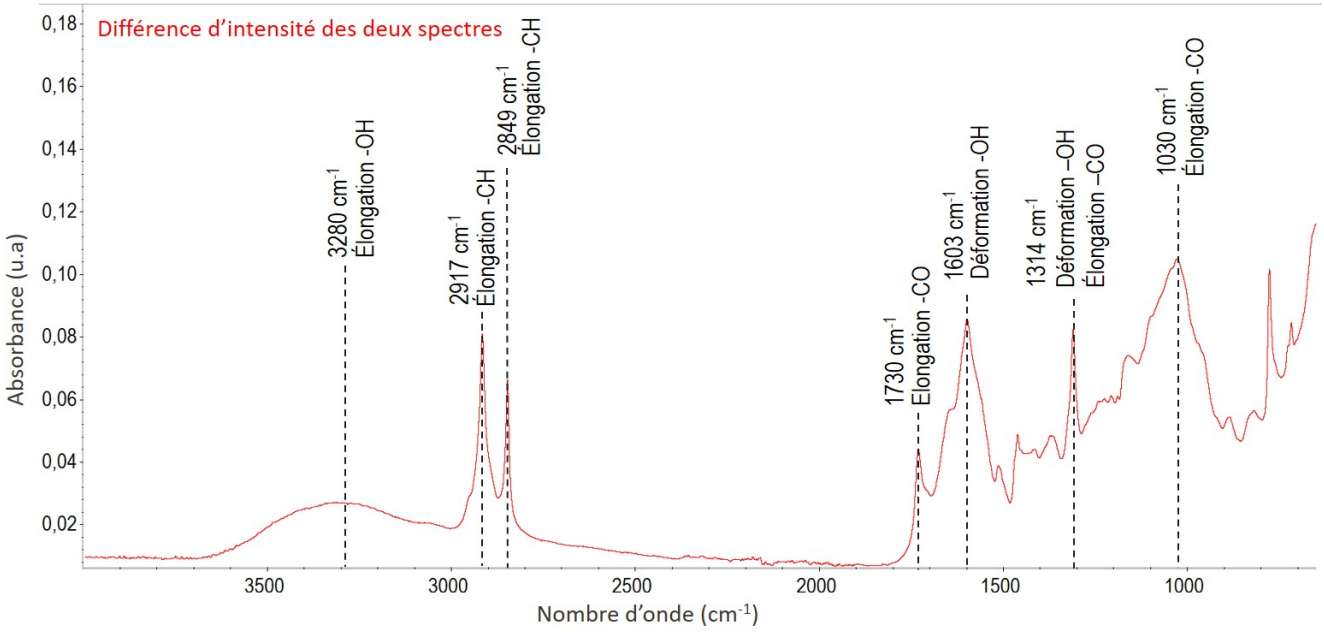
Le spectre EDX (figure III.22) révèle la présence d'éléments similaires à ceux identifiés sur la figure III.17 (seuil n°1). Ces éléments sont associés à l'introduction de composés organiques au contact ainsi qu'aux matériaux utilisés pour la fabrication des premiers corps (aciers de nuance ER7 et R260). Il est important de noter que la présence de fer n'est pas significative dans les analyses EDX et ce, sur l'ensemble des échantillons prélevés à ce stade d'un essai.

L'analyse des troisièmes corps prélevés (seuil n°3) par spectroscopie IR est comparée aux résultats du seuil n°1 (figure III.23a). L'objectif est de mettre en évidence les points communs et différences des spectres obtenus afin de caractériser les modifications physico-chimiques du troisième corps.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)

FIGURE III.23 – Superposition des spectres IR pour un essai à taux de glissement 1% et une hygrométrie relative de 50%. a) Spectres associés aux seuils n°1 (facteur de frottement minimum) et n°3 (facteur de frottement maximum). b) Différence des intensités des deux spectres.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

La superposition de ces deux courbes fait apparaître des liaisons excitées à mêmes nombres d'ondes. Le tracé de la différence d'intensité des deux spectres permet de mettre en évidence les liaisons suivantes :

- 3280 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -OH,
- 2917 et 2849 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CH,
- 1730 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CO (après oxydation),
- 1603 cm^{-1} : vibrations de déformations des liaisons -OH,
- 1314 cm^{-1} : combinaison de vibrations de déformations des liaisons -OH et de vibrations d'élongations des liaisons -CO,
- 1030 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CO.

Les nombres d'ondes relevés sont parfois identiques à ceux obtenus lors de la comparaison des spectres pour une feuille non introduite au contact et un frottement minimum (seuil n°1, figure III.18). Nous pouvons alors supposer que ces liaisons continuent d'être sollicitées en raison du taux de glissement imposé.

Au contraire, il est intéressant de noter que la bande d'absorption relevée pour un nombre d'onde égal à 1314 cm^{-1} n'apparait pas lors du tracé précédent (seuil n°1). Cette bande est corrélée à une combinaison de vibrations de liaisons -OH et -CO. Il est donc possible de supposer que la transmission d'énergie au contact par un troisième corps active des groupements liés à ces deux liaisons.
Les différences d'intensité traduisent des transformations physico-chimiques survenues entre le seuil n°1 (minimum d'adhérence) et le seuil n°3 (maximum d'adhérence). Ces dernières restent à être explicitées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Etude des spectres IR de référence, et obtenus aux seuils n°1 et n°3

Les spectres correspondants aux analyses IR de deux troisièmes corps (seuil n°1 et n°3) sont complétés par l'ajout d'un spectre IR de référence. Ce dernier correspond à l'analyse d'une feuille morte avec une hygrométrie relative égale à 50% non introduite au contact. Ces données sont visibles sur la figure III.24.

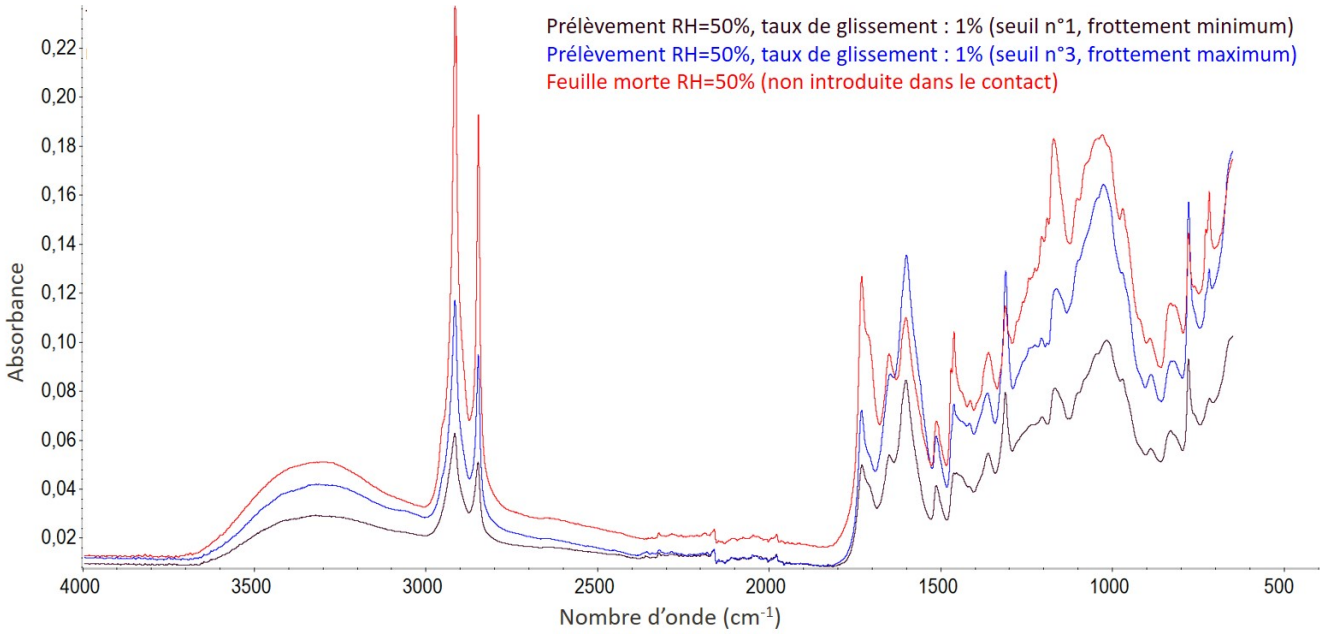


FIGURE III.24 – Superposition des spectres IR des seuils n°1 et n°3 pour un essai à taux de glissement de 1%, une hygrométrie relative de 50%, et une feuille morte à RH=50% non introduite dans le contact.

La courbe d'absorption IR de l'échantillon de référence (feuille morte) permet de mettre en évidence des différences d'intensités importantes (écarts maximaux d'intensité supérieurs à 20%). Ces différences sont synonymes d'une influence non négligeable des transformations physico-chimiques survenues au contact et dans la couche de troisième corps. Ces mêmes transformations n'ont néanmoins pu être explicitées durant ces travaux par manque de temps pour l'utilisation de moyens d'analyses physico-chimiques avancés.

Plus généralement, les spectres visibles sur la figure III.24 laissent apparaître des différences d'intensités pour l'ensemble de la gamme de mesure. Il est alors possible de relier les modifications physico-chimiques du troisième corps aux sollicitations mécaniques, et plus particulièrement, au facteur de frottement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

III.2.4.3.c Conclusions des analyses physico-chimiques réalisées sur des troisièmes corps externes

Le tableau III.13 décrit les seuils d'énergie nécessaires aux transitions entre les différentes régions. Il synthétise la capacité d'un troisième corps à transmettre une énergie mécanique aux premiers pour une variation d'adhérence donnée.

Des échantillons de troisièmes corps ont pu être prélevés pour des facteurs de frottement minimum (seuil n°1) et maximum (seuil n°3). Leurs observations par microscopie optique et électronique ont permis de constater uniquement pour le seuil n°1 la présence d'éléments caractéristiques de la structure organique d'une feuille morte (stomate, nervures, fibres) et de fronts de fissures. Ces derniers prouvent la présence d'un mode d'accommodation de type M2 (fissure) et va dans le sens des débits observés. Ce mode n'est cependant plus retrouvé pour le seuil n°3.

Des analyses infrarouges réalisées sur un troisième corps de référence et au seuil n°1 ont permis de mettre en évidence des transformations physico-chimiques associées aux constituants organiques. Ces dernières se produisent avant même le début d'un essai et dès la modification de l'hygrométrie relative. Plusieurs différences d'intensité sont aussi retrouvées lors de la comparaison des spectres de ces deux troisièmes corps (référence et seuil n°1). Elles peuvent être justifiées par l'application d'un taux de glissement imposé.

La comparaison des spectres IR obtenus pour le seuil n°1 et le seuil n°3 révèlent la présence de bandes d'absorptions identiques en termes de nombre d'onde mais différentes en termes d'intensité. Cette différence peut de nouveau être corrélée à l'application d'un taux de glissement imposé au contact et est liée à l'activation des débits identifiés. On notera toutefois que des liaisons -OH et -CO ont été mises en évidence entre ces deux seuils. Ces dernières influent sur les variations du facteur de frottement.

Plus généralement, les résultats d'analyses spectrales ont permis de mettre en évidence la présence de transformations physico-chimiques sur les troisièmes corps étudiés. Elles sont couplées à des modifications de morphologies du troisième corps. Enfin, on notera que la réalisation d'analyses IR associées au seuil n°4 n'est pas judicieuse. En effet, l'activation des débits d'éjection du troisième corps a pour conséquence de nettoyer mécaniquement la surface des galets utilisés. L'analyse infrarouge sur une surface métallique ne donnera alors pas de résultats exploitables (partie II.2.3). D'autres moyens d'analyses physico-chimiques non disponibles, par faute de temps, au cours de cette thèse (spectroscopie RMN, spectroscopie à décharge luminescente, diffraction des rayons X) peuvent compléter les résultats donnés dans cette partie.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

III.3 Conclusions

D'un point de vue mécanique, l'utilisation du banc d'essais Triboring permet d'obtenir des variations de facteurs de frottement répétables avec et sans présence de feuilles. L'ajout de ce troisième corps externe est à l'origine de variations non triviales des facteurs de frottements mesurés. Leurs évolutions sont néanmoins en accord avec l'état de l'art actuel et servent à identifier des variations monotones. Ces dernières sont utilisées pour définir 5 régions. Des informations supplémentaires reliant les débits de troisième corps observés aux régions définies ont pu être obtenues grâce au tracé des variations cycliques du facteur de frottement.

D'un point de vue énergétique, les limites des régions sont utilisées pour définir 4 seuils. Ils correspondent respectivement aux énergies transmissibles par le troisième corps pour atteindre une adhérence minimale, identique à une situation de référence (sans feuilles, mais transitoire), maximale (transitoire), et stabilisée. Ces seuils mettent en exergue la capacité d'un troisième corps à transmettre aux premiers corps tout ou partie de l'énergie dissipée par frottement pour solliciter l'adhérence du contact dans des conditions données. Cette lecture énergétique des variations du facteur de frottement peut être particulièrement adaptée pour la réalisation d'une étude paramétrique (chapitre IV).

La réalisation d'analyses par spectroscopie IR de plusieurs échantillons de troisième corps a mis en évidence des couplages tribologiques, mécaniques et chimiques reliant plusieurs résultats obtenus au cours de ce chapitre.

Plus généralement, l'utilisation de l'ensemble des outils et méthodes d'analyses définis en partie II.2.3 apporte des informations permettant de comprendre le déroulement d'une perte d'adhérence (dans des conditions d'essais fixées dans cette partie). La méthode utilisée au cours de ce chapitre est synthétisée sur la figure III.25.

La réalisation d'essais d'adhérence sur le banc Triboring est effectué en prenant en compte deux paramètres d'entrée (hygrométrie relative des troisièmes corps et taux de glissement appliqué au contact). L'activation d'un phénomène mécanique (variation de l'effort tangent et du facteur de frottement) est reliée à l'activation d'un phénomène physico-chimique (activation de liaisons spécifiques) et/ou réciproquement. Les résultats présentés au cours de ce chapitre ne sont donnés que pour un seul couple de conditions tribologiques initiales (taux de glissement et hygrométrie relative). Pour autant, l'état de l'art actuel (partie II.2) met en évidence que plusieurs hygrométries relatives et taux de glissement sont susceptibles de modifier le déroulement d'une perte d'adhérence d'un train.

L'objectif du chapitre suivant est alors d'appliquer la méthode d'étude suivie ici, afin de réa-

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

liser une étude paramétrique portant sur la modification de l'hygrométrie relative, et du taux de glissement, en lien avec l'adhérence ferroviaire.

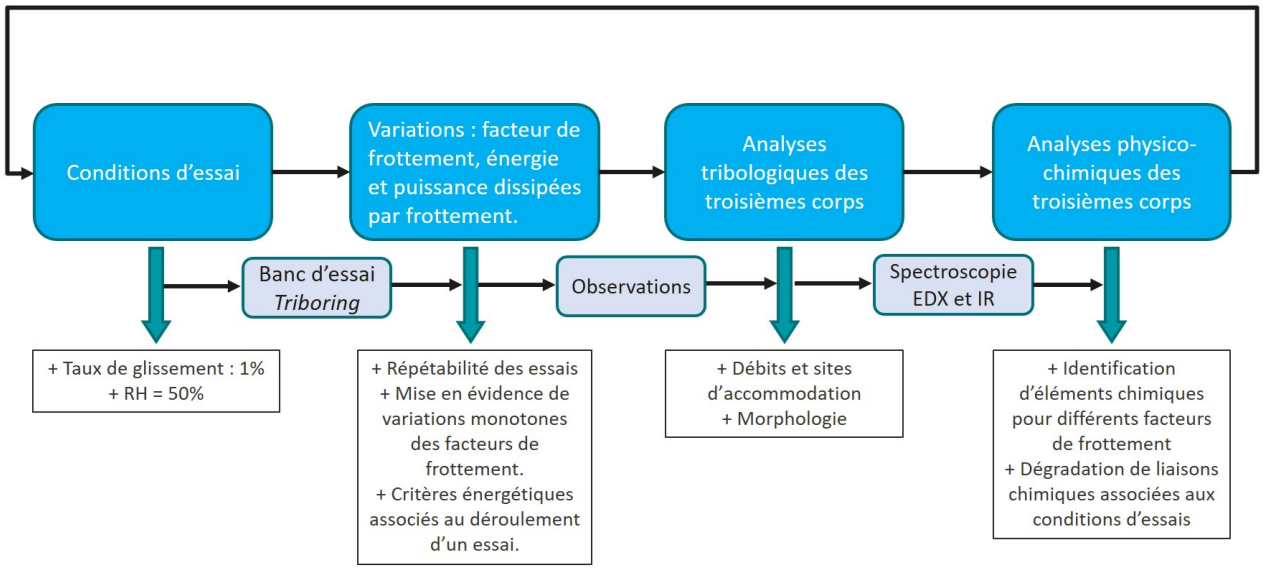


FIGURE III.25 – Méthode suivie pour l'analyse des variations d'adhérence faisant suite à un essai(taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 50%) sur le banc d'essai Triboring . Cette méthode d'analyse est suivie pour la réalisation d'une étude paramétrique explicitée sur le chapitre IV.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre IV

Etude paramétrique de l'adhérence d'un contact rail-roue en présence d'un troisième corps externe organique

Sommaire

IV.1 Analyse tribologique paramétrique 171
IV.2 Analyses mécaniques de l'effet de l'hygrométrie relative et du taux de glissement sur l'adhérence d'un contact rail-roue 171
IV.2.1 Essais d'adhérence réalisés sans troisième corps externe 172
IV.2.2 Essais d'adhérence réalisés en présence d'un troisième corps externe . . 174
IV.3 Analyses énergétiques des variations d'adhérence en présence d'un troisième corps externe organique 185
IV.3.1 Variations de puissances dissipées par frottement 185
IV.3.2 Variations énergétiques de l'adhérence au contact 190
IV.4 Analyses physico-chimiques des troisièmes corps externes 193
IV.4.1 Analyses infrarouges d'échantillons de troisièmes corps externes non introduits dans le contact 194
IV.4.2 Analyses infrarouges d'échantillons de troisièmes corps externes introduits dans le contact 196
IV.5 Conclusions 206

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

IV.1 Analyse tribologique paramétrique

L'hygrométrie relative du troisième corps couplée au taux de glissement appliqué au contact, sont deux paramètres qui influent sur l'évolution de l'adhérence au contact rail-roue. Cette idée est justifiée par l'étude bibliographique (chapitre I) et appuyée par différents retours d'expériences industriels techniques et scientifiques (chapitre II). La réalisation d'essais pour un couple de conditions d'hygrométrie et de glissement donné (chapitre III) a permis illustrer la présence de phénomènes répétables dont l'évolution peut être décrite grâce à de multiples outils mécaniques et physico-chimiques (figure III.25).

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence des liens forts entre variations mécanique et physico-chimique de l'adhérence du contact rail-roue. Pour autant ces résultats n'ont été obtenus que pour un seul couple de conditions (taux de glissement, hygrométrie relative). Ce chapitre a pour objectif de caractériser les liens entre les variations du taux de glissement et de l'hygrométrie relative d'un troisième corps externe sur l'adhérence de ce contact.

IV.2 Analyses mécaniques de l'effet de l'hygrométrie relative et du taux de glissement sur l'adhérence d'un contact rail-roue

Les variations d'adhérence d'un contact rail-roue sont ici traduites par les variations du facteur de frottement calculé (partie II.2.3).

Les différentes conditions d'essais appliquées sur le banc Triboring sont reprises dans le tableau IV.1. Leur choix a été justifié en partie I.4.2. Cette section a pour but de présenter et analyser les résultats issus des campagnes d'essais réalisées sur banc à partir de ces conditions. L'objectif est alors de caractériser l'influence de l'hygrométrie relative et du taux de glissement sur l'adhérence du contact reproduit.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Conditions d'essai	Hygrométrie relative du troisième corps		
Taux de glissement	[30 ; 35%]	[45 ; 55%]	$\leqslant$ 85%
0%	x	x	x
0.5%	x	x	x
1%	x	x	x
1.5%	x	x	x
2%	x	x	x
2.5%	x	x	x

TABLEAU IV.1 – Liste des conditions d'essais appliquées sur Triboring.

IV.2.1 Essais d'adhérence réalisés sans troisième corps externe

L'effort normal appliqué durant l'ensemble des essais est lié au poids propre de la cellule tribologique. Il est donc globalement constant quel que soit l'essai. Cependant, des variations existent et sont principalement liées aux mouvements de la cellule tribologique (en lien avec sa raideur) et aux passages de feuilles dans le contact. Ces derniers modifient aussi les efforts tangents mesurés au contact.
Par conséquent, le facteur de frottement, ainsi que les grandeurs énergétiques correspondantes (mentionnés en partie IV.3), ne peuvent être identiques lors de la réalisation d'essais avec et sans feuilles.
La détermination de facteurs de frottement qualifiés de "références" et liés à la réalisation d'essais sans feuilles est nécessaire. Ces données permettront de comparer l'évolution de l'adhérence avec et sans présence de feuille pour l'ensemble de la matrice d'essai visible sur le tableau IV.1.

Ces valeurs de référence sont données sur la figure IV.1. Les conditions d'essais sont identiques à celles appliquées au cours du chapitre III et définies sur le tableau II.2.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

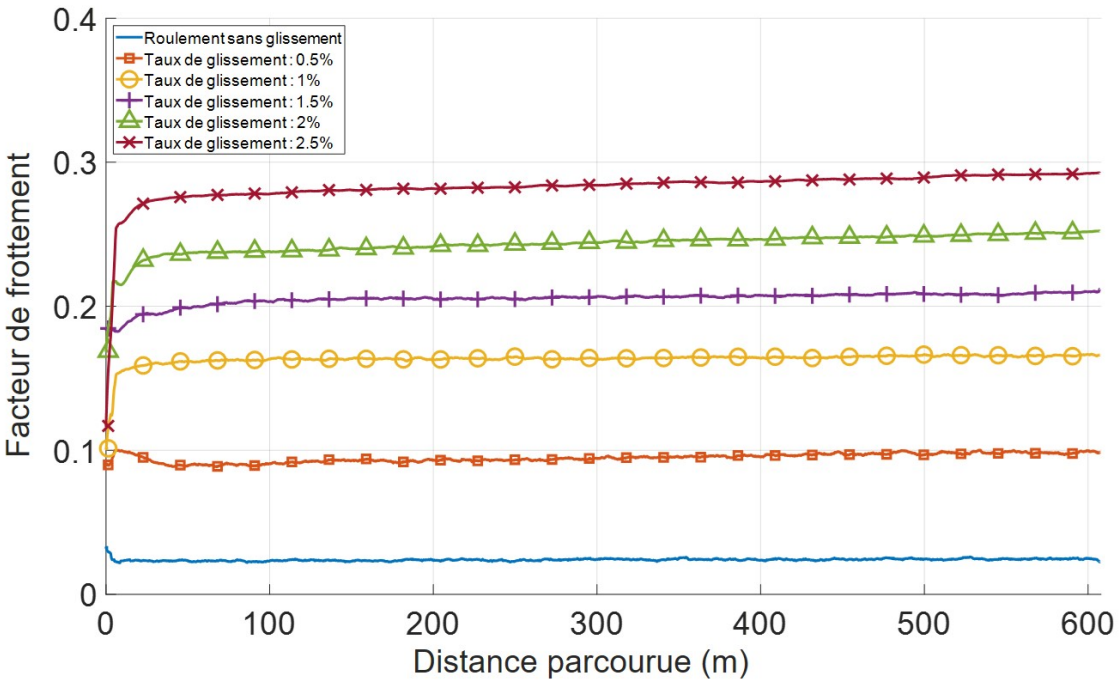


FIGURE IV.1 – Facteurs de frottement calculés pour différents taux de glissement sans ajout de troisième corps externe (feuilles mortes). Les conditions d'essais appliquées sont indiquées sur le tableau II.2.

Le calcul de la moyenne et de l'écart-type prise sur chaque cycle des valeurs mentionnées sur la figure IV.1 est utilisé pour l'obtention de facteurs de frottement de référence pour un état stabilisé (couronne et galet rodés). Ils sont synthétisés sur le tableau IV.2.

	Facteur de frottement	
Taux de glissement (%)	*Moyenne*	*Ecart-type*
Roulement sans glissement (RSG)	0.02	0.006
0.5%	0.10	0.0028
1%	0.16	0.0012
1.5%	0.21	0.0018
2%	0.24	0.0043
2.5%	0.28	0.0045

TABLEAU IV.2 – Facteur de frottement obtenus après essais réalisés sans troisième corps externe.

Les valeurs de tableau sont inférieures à 0.3, limite utilisée communément dans l'industrie ferroviaire [110][105], mais sont néanmoins cohérentes avec différentes études visant à étudier l'adhérence du contact rail-roue en l'absence de troisième corps externe [66, 113, 133].

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Les différents facteurs de frottement obtenus au travers de mesures d'efforts associés aux essais sans feuilles (tableau IV.1) tendent vers une limite (0.3) dépendant du taux de glissement. Cette limite correspond à une phase de glissement complet de l'ellipse de contact (cf partie I.24) mise principalement en évidence pour des taux de glissement inférieurs ou égaux à 1%.

L'application d'un taux de glissement supérieur à 1% engendre une augmentation pseudo-linéaire du facteur de frottement. Ce phénomène est négligé du fait de l'évolution lente constatée. L'augmentation maximale calculée est de 0.3% pour 100 mètres parcourus. En outre, les limites associées à ces variations n'ont pas été mises en exergue lors des essais réalisés. Leur détermination aurait nécessité la réalisation d'essais longs (de l'ordre de 3500 à 4000 mètres parcourus) ne faisant pas partie des objectifs de cette thèse.

Pour ces taux de glissement, un élargissement de la bande de contact des galets en acier de nuance ER7 est remarqué. La géométrie de ces pièces est donc modifiée. Le bombé de rayon égal à 70mm augmente, le galet devient alors quasi cylindrique au terme de la réalisation de l'ensemble de la matrice d'essais suivie. La pression de contact diminue (perte estimée de l'ordre de 150 MPa).

Les facteurs de frottement issus d'essais sans feuilles (valeurs de référence) peuvent ainsi servir de référence à ceux obtenus avec un troisième corps externe organique (feuilles mortes).

IV.2.2 Essais d'adhérence réalisés en présence d'un troisième corps externe

Les essais d'adhérence avec un troisième corps externe (tableau IV.1) sont réalisés selon la méthode et le protocole décrits au chapitre III.

IV.2.2.1 Déroulement d'une perte d'adhérence pour différents taux de glissement et hygrométries relatives des troisièmes corps externes

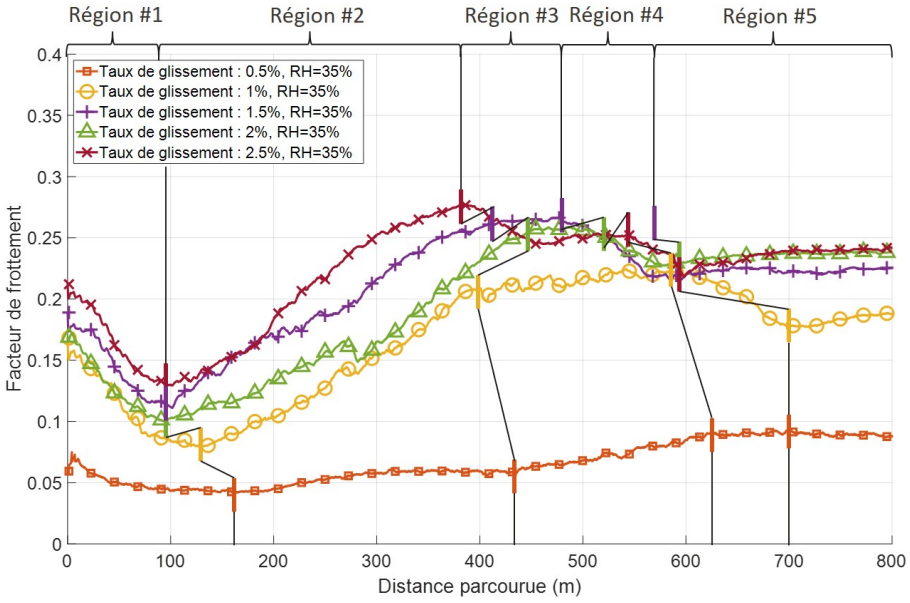
IV.2.2.1.a Effets de l'hygrométrie relative et du taux de glissement sur l'adhérence

Les résultats du chapitre III ont mis en évidence différentes morphologies de troisièmes corps pour différents niveaux d'adhérence mesurés. Elles sont corrélées à une évolution du facteur de frottement décrite à l'aide de 5 régions au sein desquelles ils sont quasi-monotones (partie III.2). Le but de cette partie est de vérifier si ces variations monotones sont aussi retrouvées dans cette étude paramétrique.

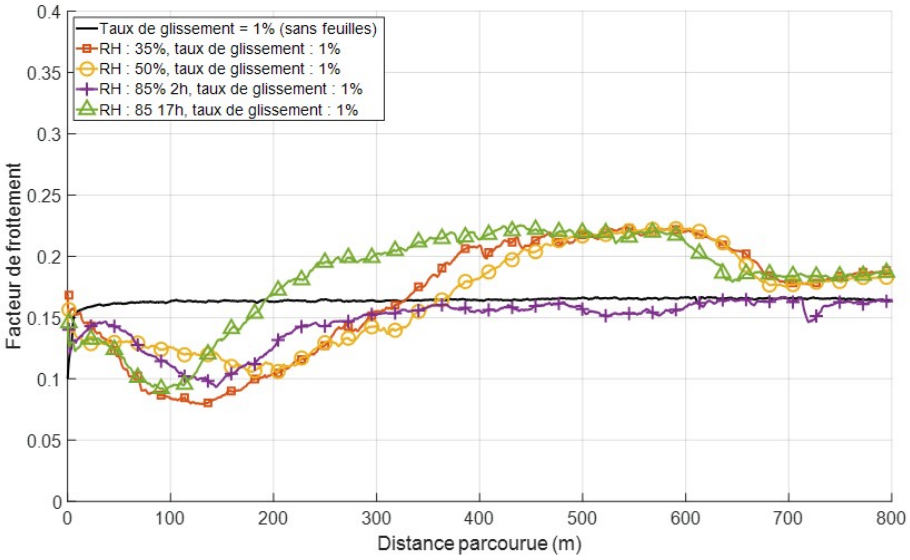
Pour cela, les résultats de la figure IV.2 sont utilisés. Ils illustrent, à titre d'exemple, la mesure

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

d'un facteur de frottement pour plusieurs hygrométries relatives et taux de glissement. Les courbes associées aux autres conditions d'essais sont visibles en annexe C



(a)



(b)

FIGURE IV.2 – a) Variations du facteur de frottement pour une hygrométrie relative égale à 35%. Mise en évidence des régions n°1 à n°5 permettant de caractériser les variations d'adhérence du contact étudié. b) Variations du facteur de frottement à taux de glissement constant et égal à 1% et pour l'ensemble des hygrométries relatives choisies.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour une hygrométrie relative donnée (exemple à 35%, figure IV.2a) :

- Le facteur de frottement augmente avec le de glissement imposé jusqu'à une certaine limite.
- Les valeurs minimales du facteur de frottement dépendent du taux de glissement appliqué. L'intersection des régions #1 et #2 permet de mettre en évidence des valeurs similaires pour, d'une part, des taux de glissement égaux à 1% et 1.5% et, d'autre part, des taux de glissement égaux à 2% et 2.5%.
- L'obtention d'un facteur de frottement maximum dépend du taux de glissement imposé.
- Le facteur de frottement final et inter-région tend vers une limite correspondant à un glissement complet de l'ellipse de contact. Ces limites n'étant pas systématiquement égales au facteur de frottement initial.

Pour un taux de glissement donné (exemple à 1%, figure IV.2b) :

- La distance nécessaire à l'obtention d'un facteur de frottement minimal est liée à l'hygrométrie relative du troisième corps. Ces valeurs sont proches les unes des autres (moins de 10% d'écarts) pour, d'une part, des hygrométries relatives de 35% et de 85% (17h de maturation), et d'autre part, des hygrométries relatives de 50% et 85% (2h de maturation).
- L'hygrométrie relative du troisième corps influe sur la distance parcourue pour laquelle un facteur de frottement minimum est obtenu. Ces derniers tendent vers des valeurs proches pour 3 valeurs d'hygrométrie relative sur 4. L'utilisation d'un troisième corps dont l'hygrométrie relative est initialement de 85% (2h de maturation) ne permet parfois pas d'identifier des extrema de facteur de frottement. Cette hygrométrie génère alors des variations de frottement non caractéristiques des essais retrouvés pour d'autres conditions.

Ces deux figures mettent donc en évidence l'influence couplée de l'hygrométrie relative et du taux de glissement sur les évolutions du facteur de frottements mesuré. Leurs variations monotones peuvent cependant ne pas être identifiées lorsque l'hygrométrie relative des troisièmes corps est de l'ordre de 85%, et ce, pour différents temps de maturation.

IV.2.2.1.b Effets du temps de maturation sur l'adhérence

Afin de caractériser les effets d'une hygrométrie relative de 85% sur l'adhérence, une modification des temps de maturation associés au troisième corps externe est réalisée. En effet, la structure des parois ligno-cellulosiques de la biomasse utilisée sur le banc Triboring est modifiée lorsqu'elle est imprégnée d'eau en milieu acide [54]. L'acidité du milieu génère une dissolution de ses constituants : la physico-chimie des troisièmes corps étudiés en est aussi modifiée (cf partie I.4.2.3). Deux temps de maturations sont ainsi considérés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Un premier de 2 heures est imposé aux feuilles de platanes utilisées. Celui-ci correspond à l'intervalle entre deux passages de trains sur des lignes à faible circulation et sujettes à des pertes d'adhérence.

Un second temps de maturation de 17 heures est imposé. Celui-ci permet d'accentuer la dégradation du troisième corps externes utilisés [54] mais n'est pas représentatif d'un intervalle de temps entre deux circulations ferroviaires. Il peut au contraire être représentatif d'une interruption prolongée de trafic (travaux, arrêt suite à un incident...). Cette valeur est principalement utilisée pour caractériser l'augmentation des temps de maturation sur les variations du facteur de frottement . Ces dernières sont visibles sur la figure IV.3.

Variations du facteur de frottement pour un temps de maturation égal à 2h, figure IV.3a :

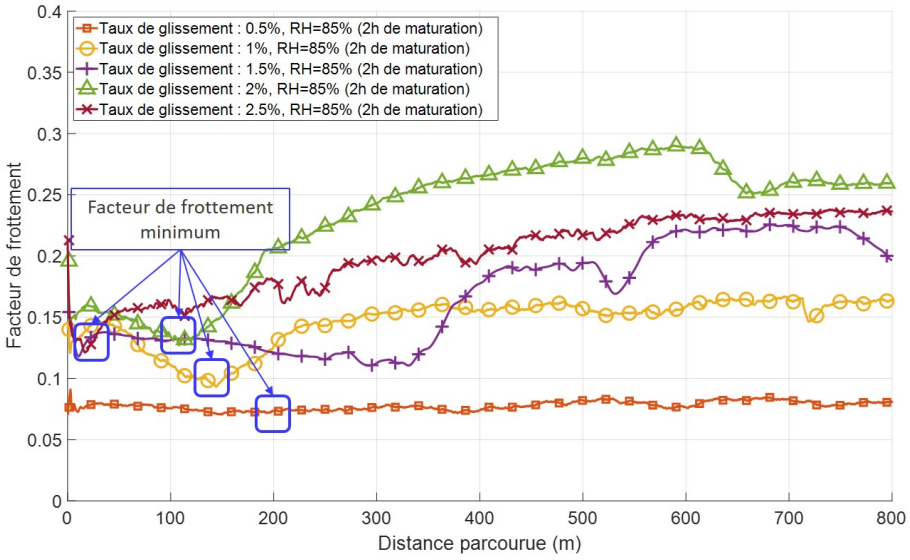
- L'augmentation du taux de glissement tend à réduire la distance nécessaire à l'obtention de facteurs de frottement minimaux.
- Les valeurs minimales et maximales des facteurs de frottement augmentent avec des taux de glissements inférieurs ou égaux à 1.5%.
- L'application d'un taux de glissement égal à 2% permet d'obtenir des facteurs de frottement (minimum, maximum et stabilisé) les plus élevés pour ce temps maturation.
- Pour des taux de glissements de 0.5%, 1%, et 2.5%, des diminutions brèves des facteurs de frottement non mises en évidence au cours du chapitre III (partie III.2) sont observées. Ces phénomènes ont pu être associés à la réintroduction de feuilles dans le contact.

Variations du facteur de frottement pour un temps de maturation égal à 17h, figure IV.3b :

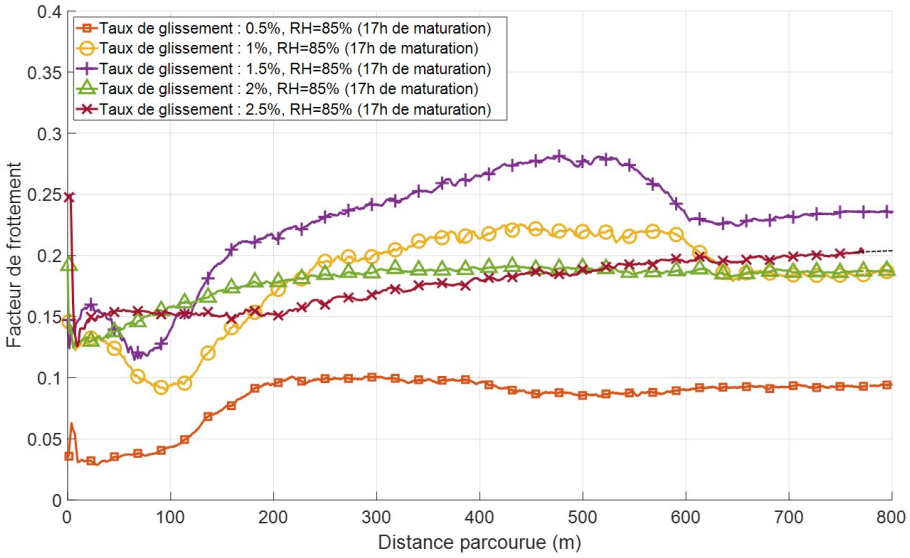
- Les facteurs de frottement minimaux sont obtenus pour des distances parcourues inférieures à 30 mètres.
- L'application d'un taux de glissement égal à 0.5% est synonyme de l'obtention de l'une des valeurs de frottement la plus faible pour ce temps de maturation.
- L'application d'un taux de glissement supérieur ou égal à 1.5% semble faire converger les facteurs de frottement. La distance nécessaire est cependant dépendante du taux de glissement.
- L'amplitude des variations des facteurs de frottement est dépendante du taux de glissement.

Les données de la figures IV.3 mettent ainsi en évidence les effets liés aux temps de maturation pour une hygrométrie relative de 85%. Ces derniers sont susceptibles de modifier les variations monotones ainsi que les valeurs minimales et maximales d'adhérence identifiées pour d'autres conditions d'essais. Le choix initial du couple de conditions d'essais permet ainsi d'aboutir à deux types d'évolution du facteur de frottement. Pour le premier, des variations monotones "classiques" d'adhérence sont retrouvées. Pour le second, des variations non monotones ("non classiques") le sont.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)

FIGURE IV.3 – Mise en évidence de l'influence du temps de maturation sur l'évolution de l'adhérence. L'hygrométrie relative (RH) est de 85% a) Variations du facteur de frottement à taux d'hygrométrie constant pour un temps de maturation de 2h b) Variations du facteur de frottement à taux d'hygrométrie constant pour un temps de maturation de 17h.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

IV.2.2.1.c Résultats généraux

Les facteurs de frottement issus des différentes conditions d'essais appliquées sur le banc Triboring peuvent être synthétisés à l'aide de trois graphiques donnant les valeurs minimales, maximales et stabilisées (figures IV.4 et IV.5). Les données triées par hygrométries relatives sont visibles sur la figures IV.4. Celles triées par taux de glissement sur la figure IV.5. Ces résultats permettent de généraliser les notions mentionnées au début de cette partie portant sur les variations globales des facteurs de frottement détaillés ci-après.

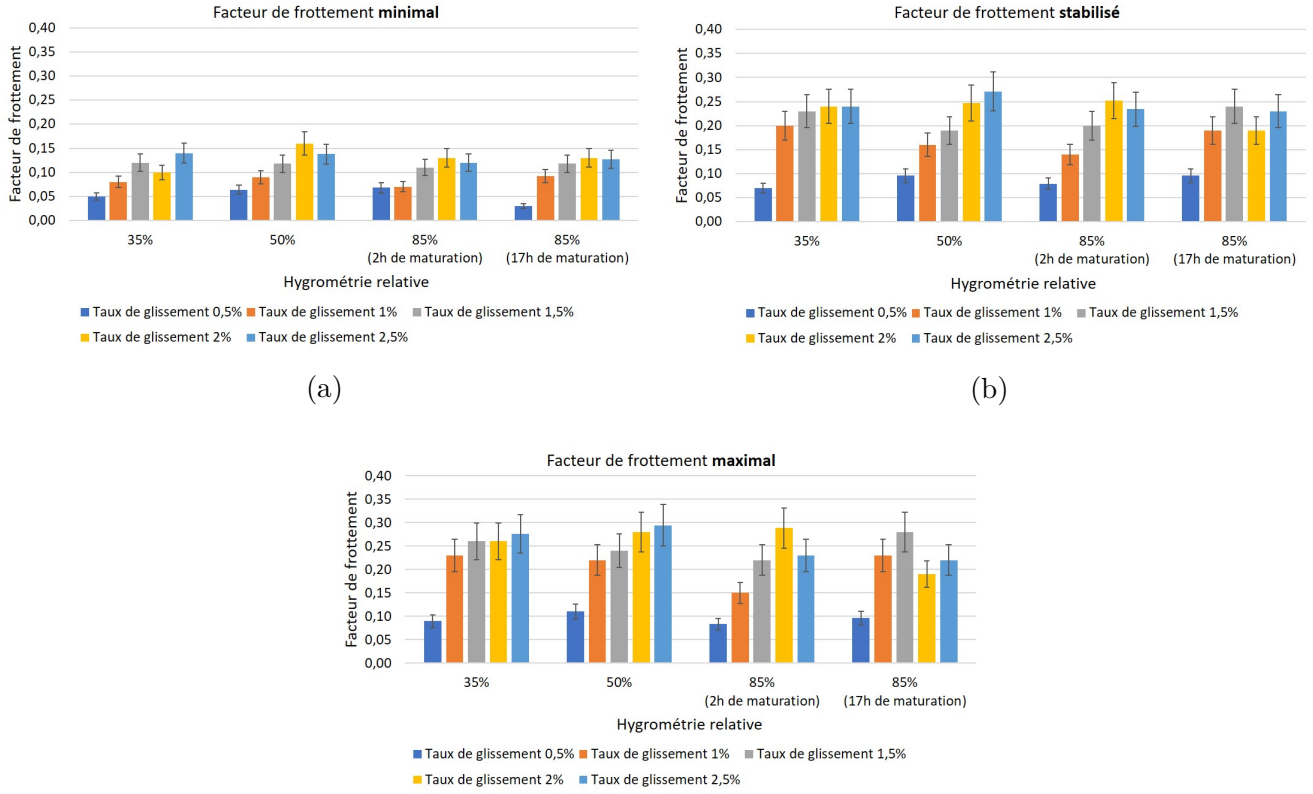


FIGURE IV.4 – Synthèses des facteurs de frottement minimaux (a), stabilisés (b) et maximaux (c) pour l'ensemble des conditions d'essais mentionnées sur le tableau IV.1 **triés par hygrométries relatives**.

Le tracé des facteurs de frottements triés par hygrométrie relative (figure IV.4) ne permet pas de donner des tendances strictes d'évolution de l'adhérence. Pour autant, lorsque les taux de glissements appliqués sont inférieurs ou égaux à 1.5%, les facteurs de frottement, minimaux, maximaux et stabilisés augmentent avec le taux de glissement. Ce résultat est cohérent avec le fonctionnement du banc d'essai utilisé (cf partie II.2.2).
La réalisation d'essais associés à une hygrométrie relative de 85% et différents temps de maturation est à l'origine de résultats ne pouvant être corrélés directement aux choix des valeurs de

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

taux glissement. Par exemple, les facteurs de frottement maximaux et stabilisés vont dépendre des temps de maturation.

Sur le même principe, le tracé des facteurs de frottements triés par taux de glissement (figure IV.5) ne permet pas, de nouveau, de donner des tendances générales d'évolution de l'adhérence. On notera néanmoins la présence de deux cas particuliers pour des taux de glissements égaux d'une part à 0.5%, 1% et 1.5%, et égaux d'autre part à 2% et 2.5%.

Pour le premier cas, les facteurs de frottement maximaux et stabilisés sont très proches (aux écarts-types près). Ce résultat est à nuancer pour les valeurs minimales ; l'application d'un taux de glissement égal à 0.5% ne permet pas de retrouver cette tendance.

Pour le second cas (taux de glissement de 2% et de 2.5%), le temps de maturation des troisièmes corps semble influer sur les facteurs de frottement maximaux et stabilisés. L'augmentation du temps de maturation tend alors à les diminuer (aux variations d'écarts-types près).

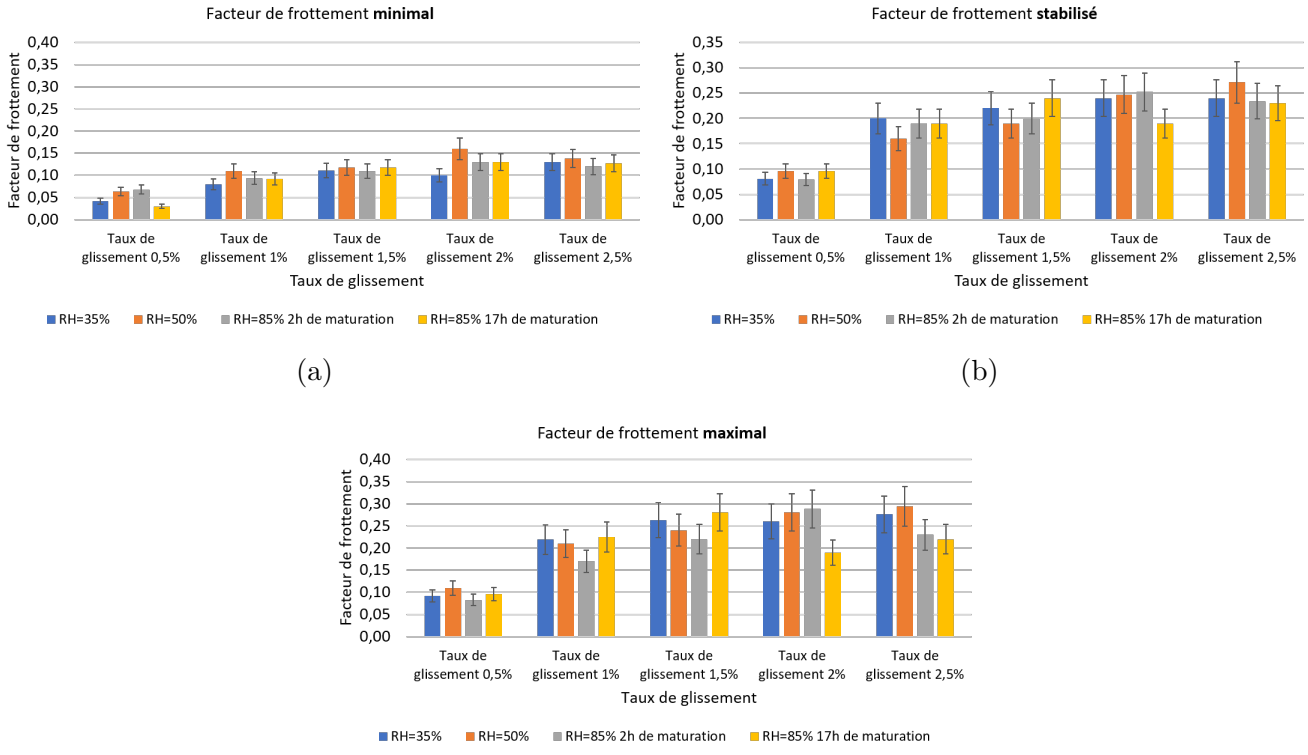


FIGURE IV.5 – Synthèses des facteurs de frottement minimaux (a), stabilisés (b) et maximaux (c) pour l'ensemble des conditions d'essais mentionnées sur le tableau IV.1 **triés par taux de glissement**.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

IV.2.2.1.d Variations cycliques des facteurs de frottement

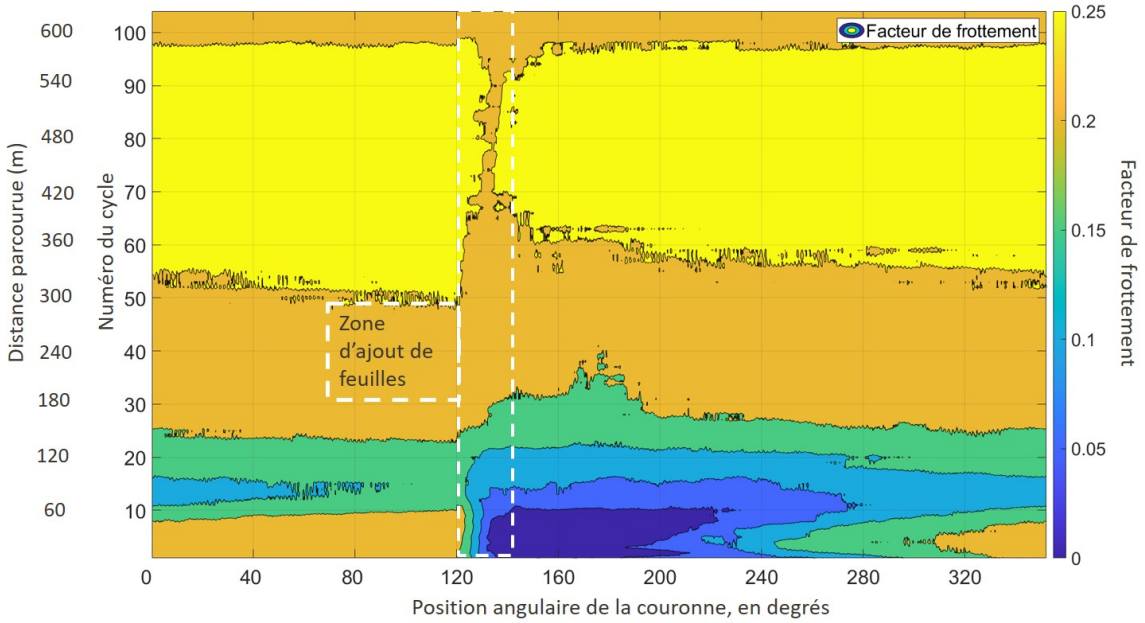
La lecture et l'analyse de l'ensemble des données mentionnées dans cette partie peut être complétée par l'utilisation de notions introduites au cours du chapitre III. Ces notions permettent de relier l'évolution de l'adhérence à l'activation de débits tribologiques spécifiés en partie III.2.2. Les résultats issus de la figure IV.3 ont montré qu'un facteur de frottement extremum n'est pas nécéssairement le résultat de mêmes distances parcourues. Par conséquent, les débits tribologiques identifiés ne sont pas activés aux mêmes instants. Ceux-ci restent cependant toujours valables, lorsque l'évolution du facteur de frottement peut être décrite à l'aide de l'une des cinq régions définies en section III.2.

Les variations globales du facteur de frottement au cours d'un essai peuvent être complétées par leur tracé cycliques. Cela permet de quantifier la capacité des troisièmes corps à diminuer puis réaugmenter l'adhérence disponible au contact pour différentes sollicitations tribologiques initiales.

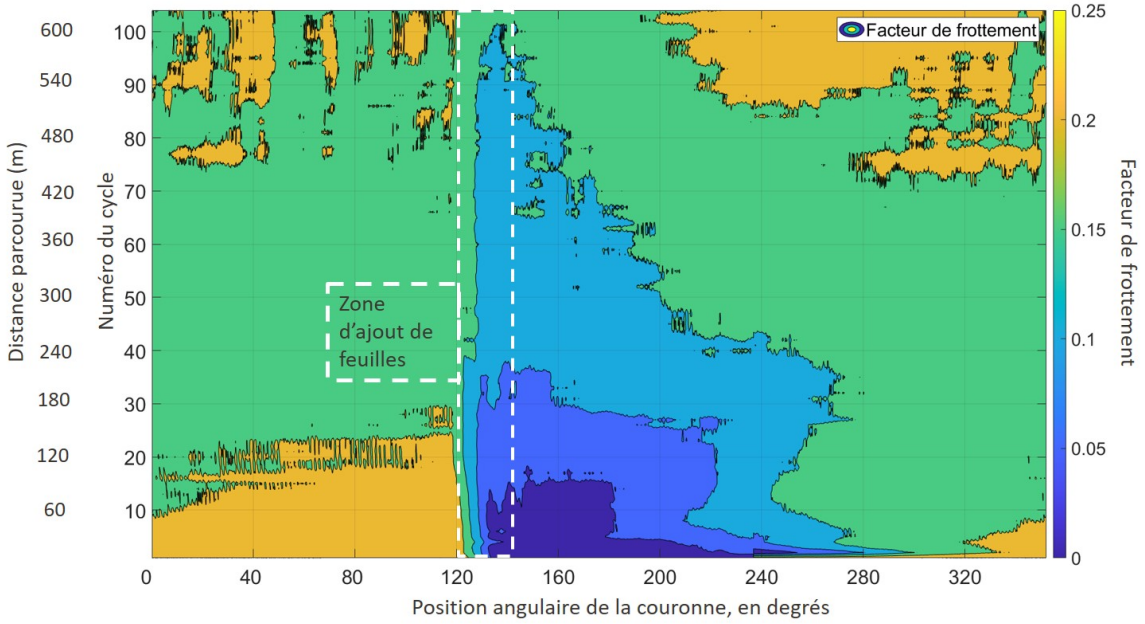
Pour réaliser cela, le facteur de frottement est tracé au cours d'un cycle de la couronne du banc Triboring. Afin de filtrer les phénomènes locaux n'étant pas au coeur de notre étude, une moyenne mobile sur un tour de galet est appliquée aux données. Cette dernière sert aussi à limiter le nombre de données à traiter.

La figure IV.6 illustre l'influence de l'augmentation du taux de glissement sur l'activation des débits de recirculation longitudinaux (cf partie I.26). Ce débit est relié à l'étalement du troisième corps au cours d'un cycle de rotation du galet. Cet étalement est associé à une diminution du facteur de frottement relative aux valeurs initiales.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)

FIGURE IV.6 – Influence du taux de glissement sur les variations cycliques d'adhérence mesurées pour une hygrométrie relative égale à 85% (17h de maturation) a) Taux de glissement de 1.5% b) Taux de glissement de 2.5%.

L'augmentation du taux de glissement appliqué au contact est synonyme d'une modulation de l'effort tangent longitudinal et des contraintes de cisaillement. Ces sollicitations mécaniques peuvent être corrélées à une augmentation du nombre de cycles à parcourir avant de retrouver des

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

facteurs de frottement similaires à ceux mesurés en débuts d'essais [8].

L'application d'un taux de glissement supérieur aux limites imposées par les logiciels d'anti-enrayages et patinages [26] influe sur les variations d'adhérence et tend à augmenter l'étalement du troisième corps (figure IV.6b). Cela est principalement mis en évidence avec l'utilisation de feuilles mortes dont la structure physico-chimique est dégradée (cf partie I.4.3). Ce phénomène peut donc être considéré comme une conséquence mécanique de la dégradation d'origine physico-chimique des feuilles utilisées.

Pour l'ensemble des conditions expérimentales (tableau IV.1), un facteur de frottement inférieur à 0.05 est mesuré dès les premiers passages du galet sur la zone d'ajout de feuilles. Les effets d'étalement mis en évidence sont originaires de cette zone et dépendent des conditions d'essais (hygrométrie et glissement). Ainsi, les pertes d'adhérence sur le banc Triboring sont reliées à la présence de feuilles mortes au contact et à l'obtention de zones de faibles facteurs de frottement (inférieur à 0.05). Ces derniers reviennent progressivement aux valeurs mesurées en début de chaque essai. Les variations du facteur de frottement sont alors qualifiées de "classiques". Elles ne sont cependant pas retrouvées pour l'ensemble des conditions d'essais appliquées pour cette étude paramétrique.

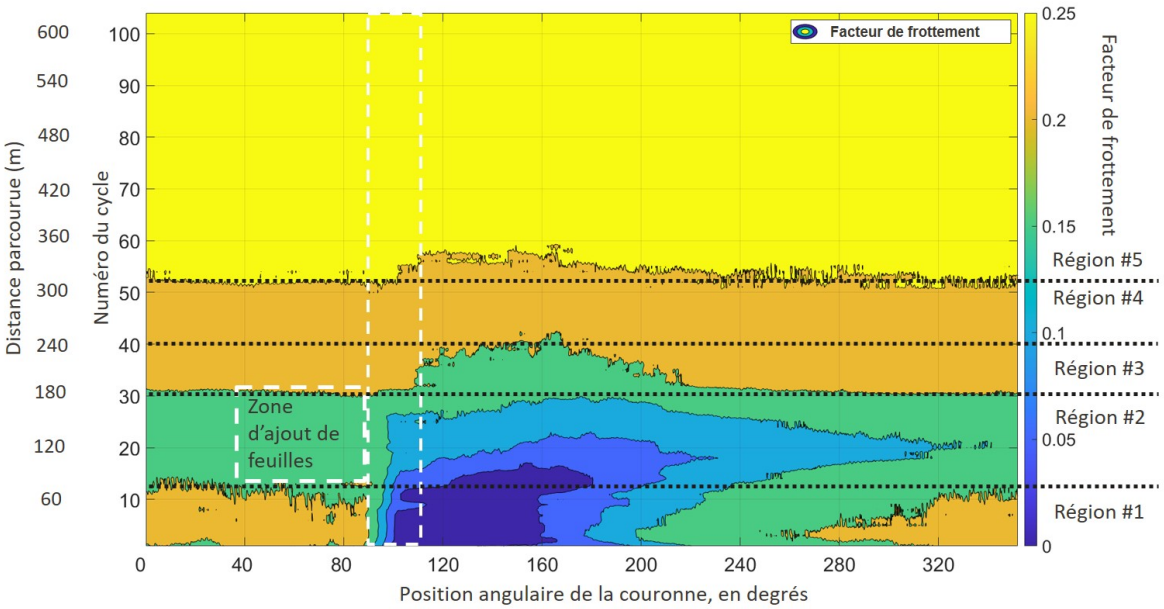
IV.2.2.1.e Variations "non classiques" d'adhérence

Des variations cycliques non classiques d'adhérence (*i.e* variations des facteurs de frottement non descriptibles par les régions définies en partie III.2.2) sont retrouvées pour les conditions suivantes :

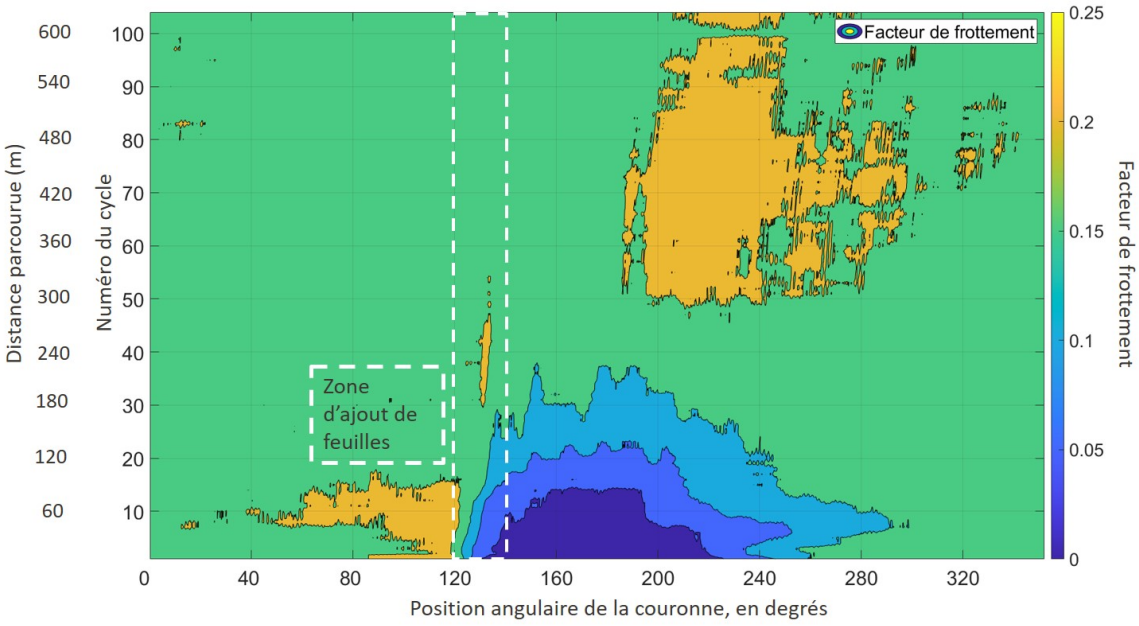
+ Taux de glissement : 0.5% : RH= 85%, 2h de maturation ;
+ Taux de glissement : 1% RH= 85%, 2h de maturation ;
+ Taux de glissement : 1.5% RH= 85%, 2h de maturation ;
+ Taux de glissement : 2% RH= 85%, 17h de maturation ;
+ Taux de glissement : 2.5% RH= 85%, 2h de maturation ; RH= 85%, 17h de maturation ;

Un exemple de résultats permettant de comparer ces deux types de variations est donné sur la figure IV.7. Les résultats associés aux autres facteurs de frottement dont les variations cycliques sont " non classiques" sont tracés en annexe E

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)

FIGURE IV.7 – Variations cycliques d'adhérence pour un taux de glissement égal à 2%. a) Variations classiques : hygrométrie relative : 85% (2h de maturation) b) Variations non classiques : hygrométrie relative : 85% (17h de maturation).

L'analyse des courbes de frottement cycliques pour ces différents cas permet de mettre en évidence l'influence du temps de maturation du troisième corps sur les variations d'adhérence. La dégradation physico-chimique (dissolution des parois ligno-cellulosiques des feuilles, partie I.4.2.3)

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

et mécanique (augmentation des contraintes de cisaillement au contact) du troisième corps modifient de façon importante l'étalement des zones de faible adhérence (augmentation de la longueur des zones concernées pour chaque cycle de la couronne).

Ces résultats restent toutefois qualitatifs. La caractérisation de la capacité d'un troisième corps à modifier l'adhérence au travers d'une dissipation de puissance (équation II.4) et d'énergie mécanique (équation II.3) par frottement apporte des informations quantitatives. Ces notions sont reprises en partie II.2.3. Couplée aux données de cette section, l'utilisation de grandeurs énergétiques va permettre de compléter la compréhension des phénomènes d'adhérence dégradée du contact rail-roue en présence de feuilles mortes.

IV.3 Analyses énergétiques des variations d'adhérence en présence d'un troisième corps externe organique

IV.3.1 Variations de puissances dissipées par frottement

IV.3.1.1 Puissances associées aux essais réalisés sans troisième corps organique

L'équation II.4 donnant la puissance dissipée par frottement est utilisée pour caractériser la capacité du troisième corps à solliciter l'adhérence, et ce, de façon relative à une situation initiale. Les courbes donnant les puissances dissipées par frottement dans le cas d'essais sans feuilles sont visibles sur la figure IV.8.

L'augmentation du taux de glissement imposé pour différents essais peut-être synonyme de celle des efforts tangents mesurés au contact. Ces derniers influent directement sur les valeurs de puissance calculées. Sans feuilles, les essais effectués avec des taux de glissement supérieurs à 1.5% génèrent une usure visible des galets utilisés (partie IV.2.1). Par conséquent, l'effort tangent varie avec la géométrie des premiers corps. Il modifie donc la puissance dissipée au cours d'un essai. Cette dernière ne reste plus constante et devient pseudo-linéaire. L'obtention de ce comportement est en cohérence avec les variations des facteurs de frottement observés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

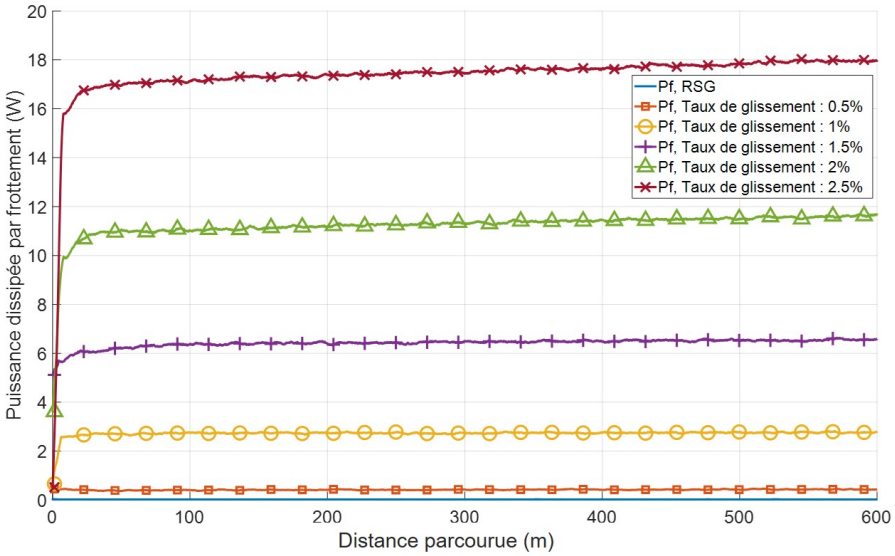


FIGURE IV.8 – Puissances dissipées par frottement (W), valeurs de référence obtenues sans ajouts de feuilles au contact. Les valeurs mesurées sur les 10 premiers mètres sont associées à la mise en mouvement du banc.

IV.3.1.2 Puissances associées aux essais réalisés avec un troisième corps organique

IV.3.1.2.a Résultats généraux

L'ajout de feuilles au contact dont l'hygrométrie relative est contrôlée, influence la façon dont la puissance est dissipée par frottement. Cette donnée est visible sur la figure IV.9 pour des taux de glissement égaux à 0.5%, 1% et 1.5% et sur la figure IV.10 pour des taux de glissement égaux à 2% et 2.5%).

L'analyse de cette grandeur permet ainsi d'associer un facteur de frottement à une puissance dissipée par frottement. Il est intéressant de noter que l'ajout de feuilles au contact modifie la puissance transmissible par les troisièmes corps aux premiers. La puissance calculée est parfois supérieure à celle identifiée lors d'essais sans feuilles (courbes pointillées). Cette notion est cependant uniquement valable pour des taux de glissements inférieurs ou égaux à 2%. Pour un taux de glissement de 2.5%, la puissance dissipée sans feuilles est presque constamment supérieure à celle mesurée en présence de feuilles. La transmission d'énergie dissipée par frottement au travers des troisièmes corps organiques est ici insuffisante pour obtenir des puissances dissipées permanentes supérieures ou égales à celles des essais sans feuilles. Elles sont ainsi reliées aux sollicitations mécaniques imposées aux troisièmes corps.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

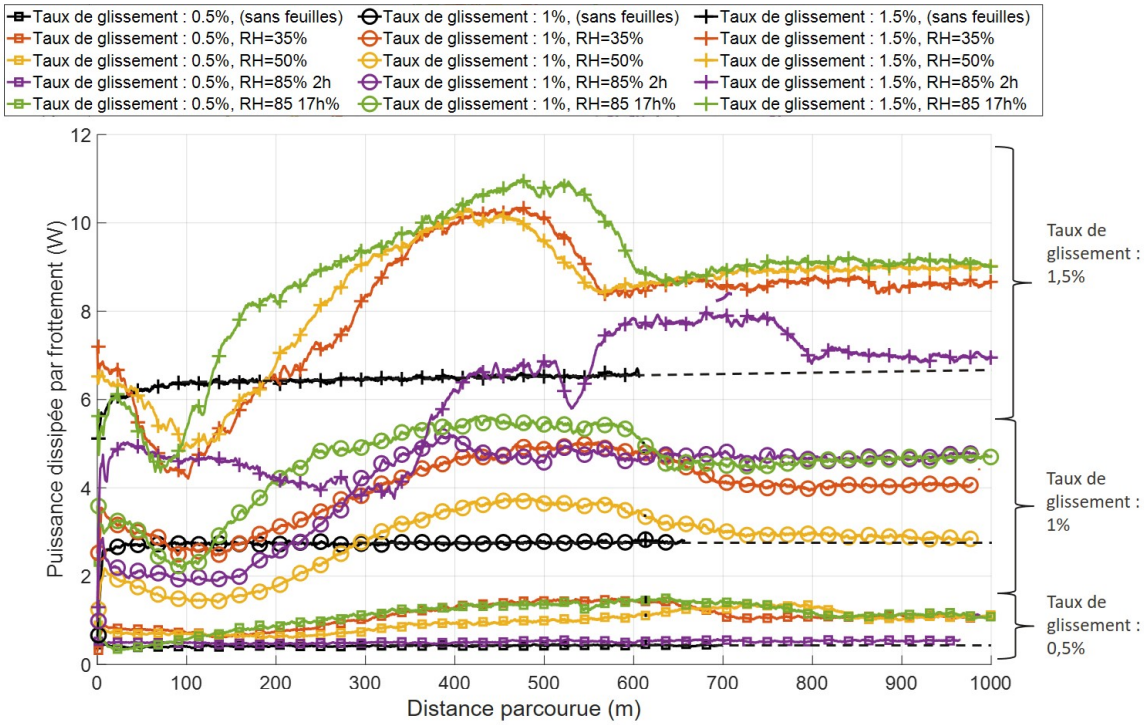


FIGURE IV.9 – Puissances dissipées par frottement (W), les taux de glissements sont égaux à 0.5%, 1% et 1.5%. Les courbes de couleur noire traduisent l'évolution de la puissance dissipée par frottement dans le cas où aucun troisième corps externe n'est introduit (valeurs de référence).

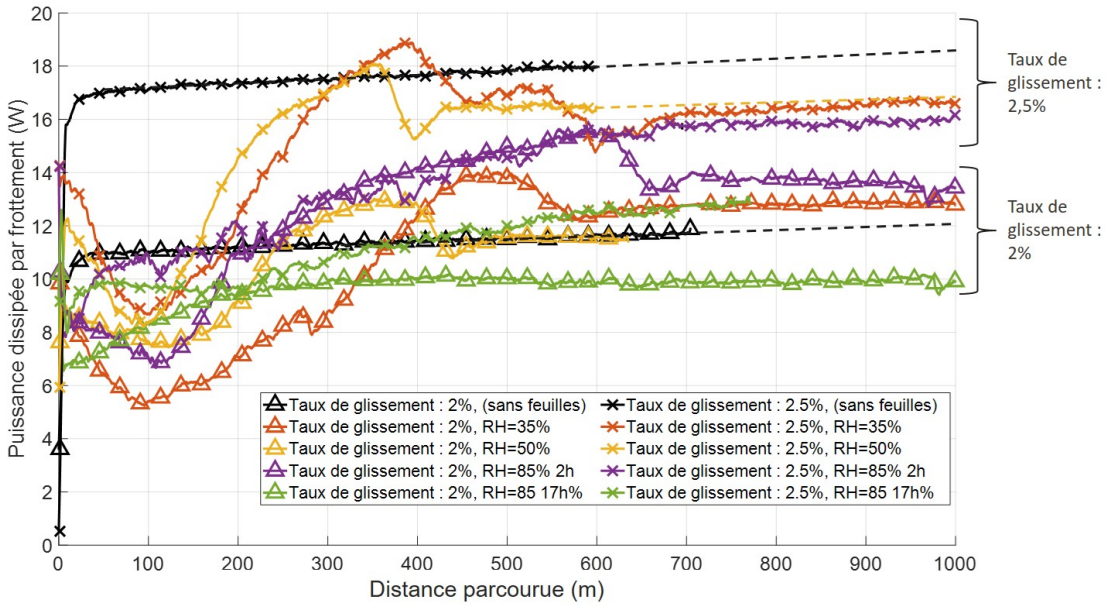
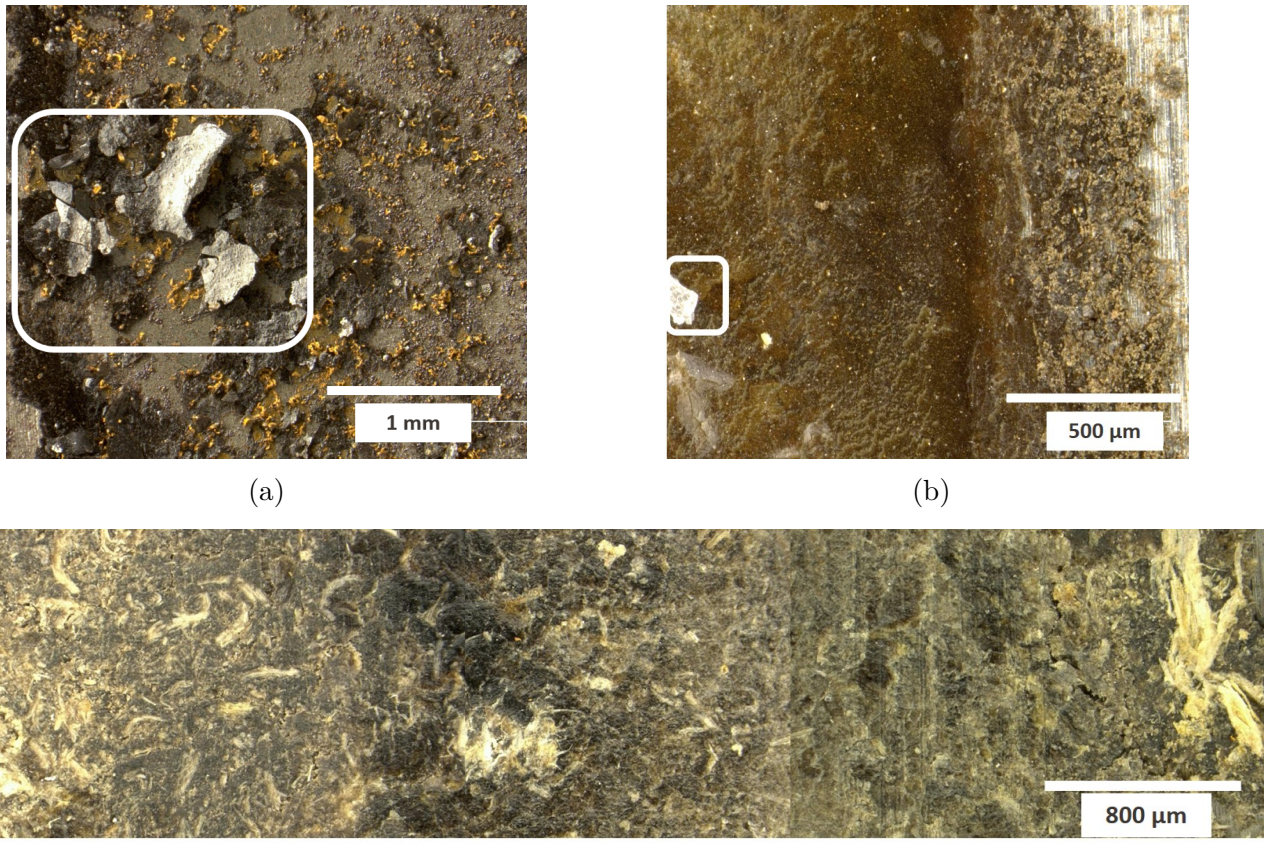


FIGURE IV.10 – Puissances dissipées par frottement (W), les taux de glissements sont égaux à 2%, 2.5%.Les courbes de couleur noire traduisent l'évolution de la puissance dissipée par frottement dans le cas où aucun troisième corps externe n'est introduit (valeurs de référence). Ces données sont parfois extrapolées (pointillés noirs) du fait de l'arrêt des essais réalisés visant à limiter l'usure des galets.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Des observations en microscopie optique de la surface des galets pour de faibles taux de glissement (0.5%) sont menées. Pour ces valeurs, l'amplitude des variations de puissance est minimale. L'observation de la surface des galets pour différentes hygrométries relatives apporte des informations complémentaires à ces données (figure IV.11). Différentes morphologies de troisièmes corps sont identifiées.



(a) (b)

(c)

FIGURE IV.11 – Observation de la surface des galets utilisés (réalisés par microscopie photonique) au cours d'essais à taux de glissement égal à 0.5% sur le banc Triboring pour différentes hygrométries relatives des troisièmes corps (a) RH=35%, (b) RH=50%, (c) RH=85%, 2h de maturation, ensemble de la surface du galet. Les clichés sont pris à l'instant correspondant où le facteur de frottement est maximal (seuil n°3).

Pour une hygrométrie relative de 35%, la présence de particules métalliques (réagissant à l'action d'un aimant) de tailles comprises entre 0.1 et 0.8 mm sont retrouvées dans le troisième corps (encadré blanc, figure IV.11-a)). Ces particules ne peuvent être issues que de l'un des premiers corps. Elles correspondent à un débit source des premiers corps (partie I.2.6). Peu de particules issues des feuilles sont mises en évidence.

Pour une hygrométrie relative de 50%, un troisième corps cohésif, parfois poudreux, est observé.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Un facies (écailles) lié au cisaillement créé par un taux de glissement fixé (partie III.2.4.3) est aussi retrouvé sur la partie cohésive du troisième corps observé. Enfin, des particules réagissant à l'action d'un aimant et de taille inférieures à 0.5mm sont mises en évidence (encadré blanc, figure IV.11b))

Pour une hygrométrie relative de 85% (2h de maturation), le troisième corps formé est compact et composés d'éléments issus des feuilles utilisées. Des fibres de tailles diverses pouvant être apparentées à des nervures de feuilles sont retrouvées. Par exemple, ce type de troisième corps est similaire en termes de morphologie à ceux retrouvés sur des zones de faible adhérence (cf partie II.3). Aucune particule réagissant à l'action d'un aimant (fer) n'est toutefois identifiée. La réalisation d'analyses MEB/EDX sur des échantillons de troisièmes corps prélevés confirme cela.

Les observations issues de la figure IV.11 permettent donc de faire l'hypothèse qu'en présence de feuilles, l'augmentation de l'hygrométrie relative limite la génération de particules d'usures des premiers corps. Ces résultats sont consistants avec des tendances observées par Lewis *et al.*[53], Zhu *et al.* [134] et Rong [62]. Les facteurs de frottement associés tendent alors à diminuer (figure IV.5-c)). La diminution de l'hygrométrie relative du troisième corps externe semble augmenter, pour certains taux de glissements, l'adhérence maximale disponible au contact. Par extrapolation, les puissances dissipées par frottement mesurées sont donc aussi reliées aux variations d'hygrométries. Cette dissipation, lorsqu'elle est importante, favorise la génération de débris d'usure des premiers corps. Cette usure est aussi observée lors de la réalisation d'essais sans feuilles pour des taux de glissements supérieurs ou égaux à 2% et dans des cas de faible hygrométrie (partie IV.2.1).

L'analyse de la puissance dissipée par frottement permet d'illustrer la capacité d'un troisième corps à transmettre une énergie mécanique aux premiers II.2.3. Cette notion, lorsqu'elle est couplée à l'observation de la surface des galets, permet aussi de justifier la présence de particules d'usure et ses effets sur l'adhérence mesurée. L'utilisation de cette grandeur (figure IV.9) soulève néanmoins la question de la capacité des troisièmes corps à solliciter l'adhérence non plus de façon instantanée, mais sur un intervalle de temps. L'analyse couplée des variations de facteur de frottement et d'énergie dissipée par frottement permet de répondre à ce besoin.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

IV.3.2 Variations énergétiques de l'adhérence au contact

IV.3.2.1 Rappel de la démarche d'analyse énergétique

Les critères énergétiques définis en partie III.2 et associés aux variations du facteur de frottement sont utilisés ici. Pour rappel, ils permettent de quantifier les énergies transmises par les troisièmes corps en lien avec une sollicitation d'adhérence donnée. Ils servent à définir 4 seuils énergétiques explicités dans la partie III.2.4.2.b

Les données énergétiques issues des seuils n°1 et n°4 n'apportent pas d'informations autres que celles produites par l'évolution des facteurs de frottement et des puissances dissipées par frottement. Par conséquent, seule l'analyse énergétique des variations d'adhérence reliée aux seuils n°2 et n°3 est détaillée ci-après. Les résultats énergétiques associés aux seuils n°1 et n°4 sont visibles en annexe F.

IV.3.2.2 Mobilisation de l'adhérence au travers de l'énergie dissipée par frottement transmissible par le troisième corps aux premiers (seuil n°2 et n°3)

IV.3.2.2.a Analyse des données énergétiques obtenues au seuil n°2

L'ensemble des données correspondant aux énergies transmissibles par le troisième corps pour le seuil n°2 est visible sur la figure IV.12. Certaines données énergétiques ne peuvent pas être tracées car il n'existe aucune intersection entre les variations d'énergie dissipée par frottement avec et sans présence de feuilles. Ces variations d'adhérence sont qualifiées de non-classiques (partie IV.3.1). Le facteur de frottement de référence ne peut donc pas être atteint dans les conditions réalisées au cours de cette thèse. Les sollicitations mécaniques appliquées au troisième corps ne sont pas probablement pas suffisantes pour générer une transmission suffisante d'énergie et aboutir aux facteurs de frottement de référence.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

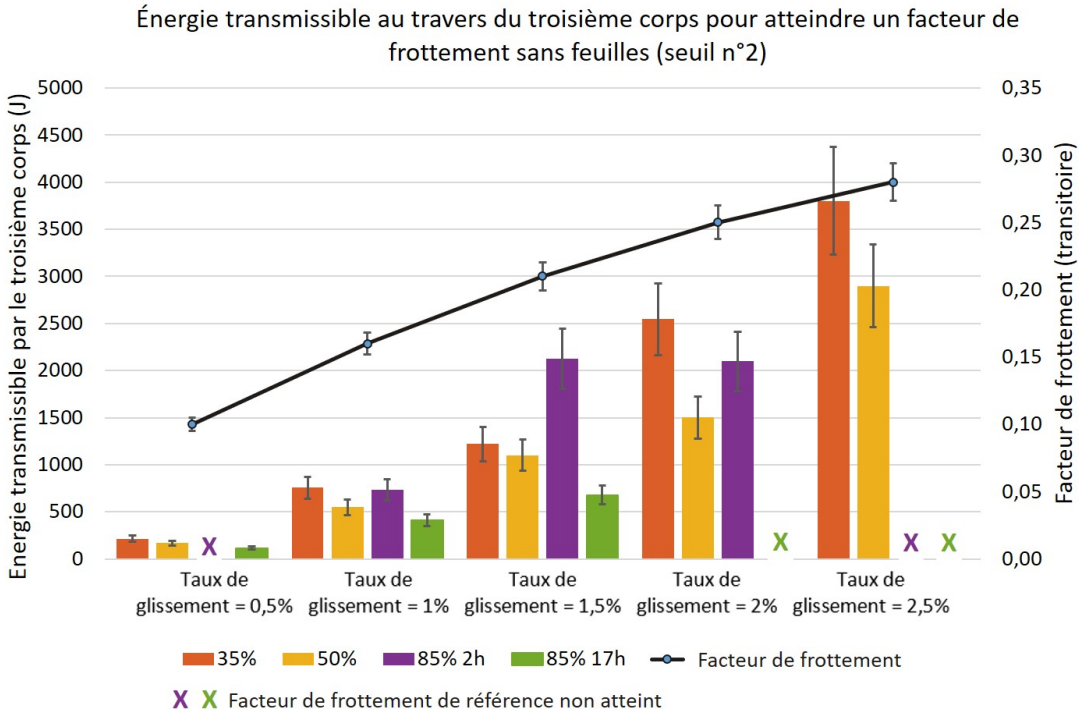


FIGURE IV.12 – Energies transmissibles par les troisièmes corps formés au seuil n°2 calculées à partir de l'énergie dissipée par frottement (équation II.3).

Par ailleurs, l'intérêt des données présentées ici repose sur le fait que la valeur d'un facteur de frottement supérieur ou égal aux valeurs de référence puisse être obtenue pour différentes quantité d'énergies transmissibles par le troisième corps. Ces dernières sont particulièrement visibles lorsque l'hygrométrie relative est de 35% ou 50%. Dans ces cas, l'énergie transmise augmente avec le taux de glissement appliqué au contact. Le troisième corps est ainsi sollicité mécaniquement de façon identique sur l'ensemble d'un essai mais transmet des énergies différentes pour atteindre un même facteur de frottement.

Par ailleurs, on peut remarquer que l'énergie transmissible par le troisième corps pour une hygrométrie relative de 50% est toujours inférieure à celles mesurées pour une hygrométrie relative de 35%. Les facteurs de frottement étant identiques pour chacun des taux de glissement, une hygrométrie relative de 50% peut correspondre à un optimum d'énergie transmissible pour ce seuil. En effet, pour cette hygrométrie, moins d'énergie est nécéssaire pour atteindre un facteur de frottement supérieur ou égal à celui d'un essai sans feuilles, et ce, pour l'ensemble des taux de glissements appliqués.

La hausse du taux de glissement au-delà des limites existantes sur les logiciels d'anti-patinage (2%) est à l'origine d'une variation pouvant aller jusqu'à 25% des énergies transmises, et ce, à même taux de glissement et donc pour de mêmes sollicitations mécaniques initiales.

En somme, les données énergétiques associées au seuil n°2 permettent de caractériser la capacité

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

des troisièmes corps à transmettre une énergie mécanique nécessaire à une reprise d'adhérence. En d'autres termes, à taux de glissement constant, des facteurs de frottement égaux peuvent être obtenus pour différentes énergies transmissibles par un troisième corps aux premiers.

IV.3.2.2.b Analyse des données énergétiques obtenues au seuil n°3

Les énergies transmises par le troisième corps au cours du seuil n°3 sont visibles sur la figure IV.13. Les résultats repris sur cette figure permettent de voir que les facteurs de frottements maximum (mais transitoires) sont de nouveau obtenus pour différentes transmissions d'énergies par le troisième corps.

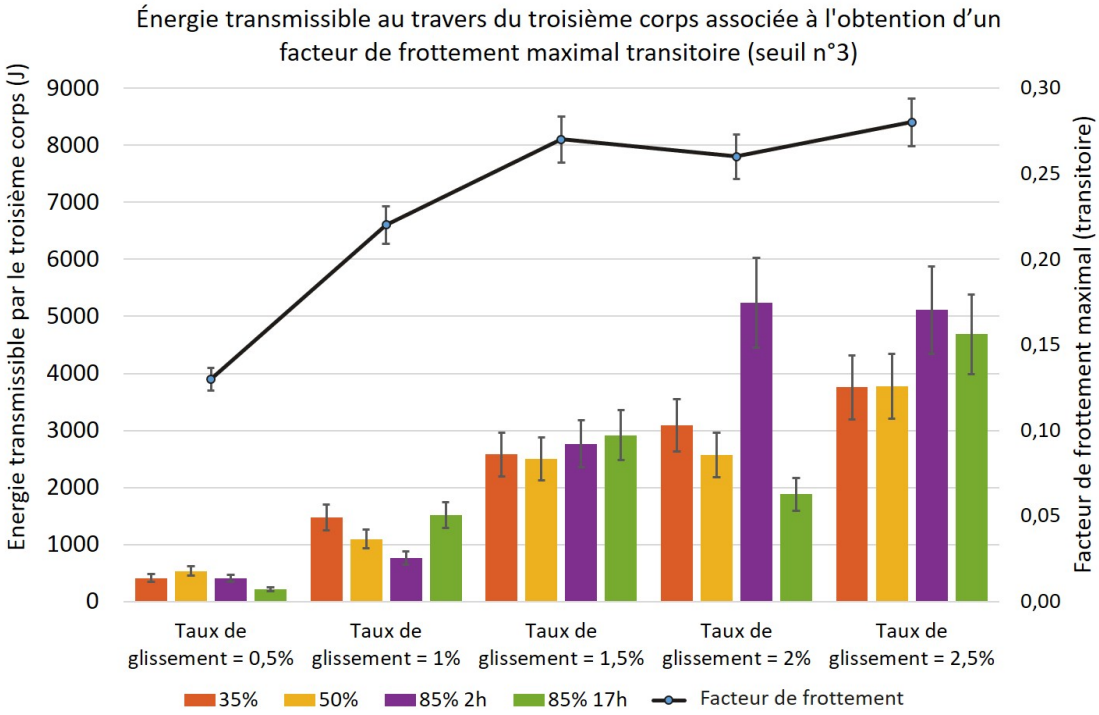


FIGURE IV.13 – Energies transmissibles par les troisièmes corps formés au seuil n°3 calculées à partir de l'énergie dissipée par frottement (équation II.3).

Il est intéressant de noter que pour des hygrométries relatives de 35% et 50%, les énergies transmissibles par le troisième corps sont proches (aux écarts-types près). Pour un taux de glissement égal à 2%, les facteurs de frottement maximaux sont de l'ordre de 0.27±15%. Pour autant, les énergies associées sont dépendantes de l'hygrométrie relative et du temps de maturation. Cette dépendance reste aussi marquée pour les autres taux de glissement. On notera toutefois, qu'à fort taux de glissement (>2%), une hygrométrie relative de 85% pour 2h de maturation permet d'obtenir dans cette étude le troisième corps pouvant transmettre le plus d'énergie pour un facteur de frottement donné.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Plus généralement pour l'ensemble des conditions étudiées, les seuils énergétiques franchis et définis en partie IV.3.2.1 sont reliés à l'activation des débits de troisième corps identifiés (partie IV.2.2). Ces derniers sont induits par une occurrence de sollicitations mécaniques (liées à l'application d'un taux de glissement non nul) et de transformations physico-chimiques (liées aux modifications initiales d'hygrométrie relatives). Par conséquent, les variations d'adhérence dépendent de ces deux types de phénomènes.

L'analyse réalisée des données énergétiques des seuils n°1 et n°3 permet ainsi de montrer, que la dissipation d'énergie par frottement n'est finalement pas une transmission mais une perte dans la transmission d'énergie et induit donc un aspect inefficace. L'analyse par spectrométrie infrarouge d'échantillon de troisièmes corps va alors permettre d'améliorer la compréhension des phénomènes physico-chimiques, associés aux différentes transmissibilités d'énergies explicitées au cours de ce chapitre.

IV.4 Analyses physico-chimiques des troisièmes corps externes

Les données mentionnées sur le chapitre III, obtenues pour une condition d'essai particulière mettent en évidence que la mesure d'un facteur de frottement maximal est associée à la présence de transformations physico-chimiques des troisièmes corps.

Afin de vérifier cela pour l'ensemble des conditions d'essais, des échantillons de troisième corps sont prélevés lors de l'obtention d'un facteur de frottement maximal (essai arrêté). Ils sont ensuite comparés aux spectres obtenus après la réalisation d'analyses IR de feuilles non introduites dans le contact. Ces derniers servent de référence et permettent d'identifier les différentes liaisons chimiques à l'origine des variations d'adhérence mesurées. Ces données permettront de corréler l'influence couplée des variations de taux de glissement et d'hygrométrie relative avec l'évolution de l'adhérence du contact rail-roue reproduit sur le banc Triboring.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

IV.4.1 Analyses infrarouges d'échantillons de troisièmes corps externes non introduits dans le contact

Trois niveaux d'hygrométrie relative des troisièmes corps externes (feuilles) sont choisis lors de la réalisation d'essais d'adhérence. Ces niveaux sont égaux à 35%, 50%, et 85% (cf partie II.2.2). Les spectres IR des échantillons de feuilles obtenus pour chacune de ces hygrométries relatives sont visibles sur la figure IV.14.

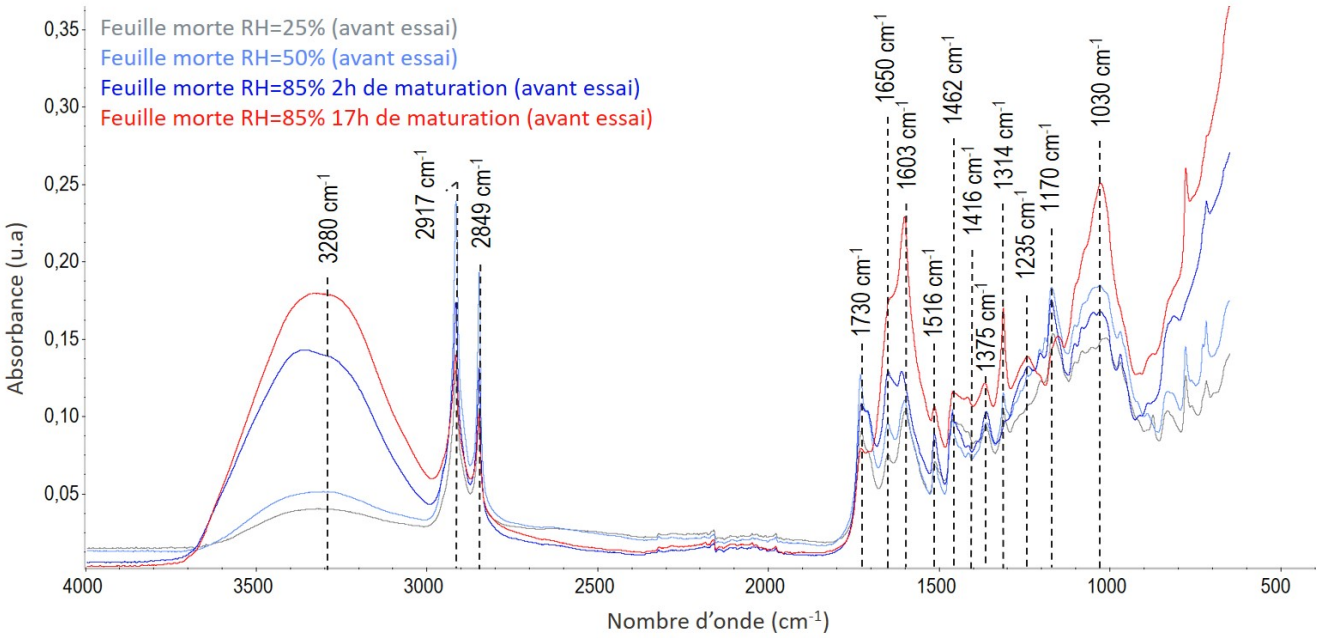


FIGURE IV.14 – Spectres IR d'échantillons de troisième corps externe (feuille mortes) non introduites dans le contact. Les hygrométries relatives sont de 25%, 50%, 85% (2h et 17h de maturation).

Les différentes hygrométries relatives appliquées au troisième corps semblent modifier la totalité des spectres IR. Ce résultat a pu être observé par Célino *et al.* [135]. Ces auteurs montrent au travers d'une analyse statistique qu'une région du spectre IR est particulièrement affectée par un changement d'humidité. Les nombres d'ondes correspondant sont compris entre 3600 et 3100 cm^{-1}. Sur cet intervalle, la présence d'eau dans les fibres de la biomasse génère une bande large dont l'intensité varie en fonction de l'hygrométrie.
Ils parviennent à démontrer par déconvolution des pics, que pour des matériaux cellulosiques, cette région représente les liaisons hydrogène inter et intramoléculaire de la cellulose, ainsi que les groupements libres de l'hémicellulose. Ces résultats recoupent ceux donnés par Cichosz et Masek [122]. La bande visible dans cette région est aussi caractéristique de la présence d'eau sous forme liquide [136][137]. Ses variations d'intensité peuvent donc être reliées aux interactions macromoléculaires de la cellulose et de l'hémicellulose ainsi qu'à la présence d'eau dans les fibres.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

L'augmentation significative de l'intensité de cette bande avec l'hygrométrie relative montre que les molécules d'eau ont alors tendance à se fixer sur ces groupements hydroxyles.
Selon ces auteurs, la modification d'hygrométrie influe aussi sur les bandes d'absorption suivantes :

- 2917 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CH (cellulose et hémicellulose),
- 2849 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CH2 (cellulose et hémicellulose),
- 1730 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CO
- 1650 cm^{-1} : vibrations de déformations de la liaison -OH de l'eau libre,
- 1416 cm^{-1} : vibrations de déformations d'un groupement carboxyle (pectine) ou vibrations de déformations des liaisons -CH2 et -CH3 (lignine).

Ces dernières peuvent ainsi être potentiellement reliées à plusieurs macromolécules issues à la biomasse étudiée. Ces bandes sont aussi obtenues lors de l'analyse IR des troisièmes corps utilisés avant la réalisation d'essais sur Triboring. Ces données permettent ainsi de confirmer la validité des analyses réalisées avec les résultats bibliographiques précédents.

Les spectres IR obtenus pour l'ensemble de ces hygrométries relatives permettent d'identifier des transformations physico-chimiques sur plusieurs groupes fonctionnels. Elles apparaissent notamment pour l'ensemble des bandes d'absorptions faisant intervenir des liaisons de type hydrogène-oxygène. Les nombres d'ondes relevés sont égaux à :

+ 3280 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -OH,
+ 1650 cm^{-1} : vibrations de déformations de la liaison -OH de l'eau libre,
+ 1603 cm^{-1} : vibrations de déformations des liaisons -OH,
+ 1314 cm^{-1} : combinaison de vibration de déformation des liaisons -OH et de vibrations d'élongations des liaisons -CO.

Pour ces quatre nombres d'ondes, l'intensité des bandes d'absorption augmente avec l'hygrométrie relative des troisièmes corps externes mais aussi avec le temps de maturation des échantillons.

La modification de l'hygrométrie relative influe naturellement sur la quantité d'eau contenue dans un solide. L'analyse par spectrométrie infrarouge des échantillons est ainsi cohérente au vu de l'augmentation de l'intensité des bandes associées aux molécules d'hydrogène et d'oxygène. Le maintien prolongé de l'hygrométrie relative du troisième corps externe à 85% met en évidence un doublement de l'intensité des pics d'absorptions relevés à 1603 cm^{-1} et 1028 cm^{-1}. Ce dernier est la conséquence de vibrations d'élongations de liaison -CO. Il peut par exemple servir de marqueur pour suivre les effets du temps de maturation sur les variations d'adhérence rencontrées.

Les changements d'hygrométrie relative initiale des troisièmes corps externes modifient donc principalement l'intensité des bandes d'absorptions corrélées aux liaisons hydrogène et oxygène. L'ensemble de ces données est considéré comme une référence pour les analyses suivantes.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

IV.4.2 Analyses infrarouges d'échantillons de troisièmes corps externes introduits dans le contact

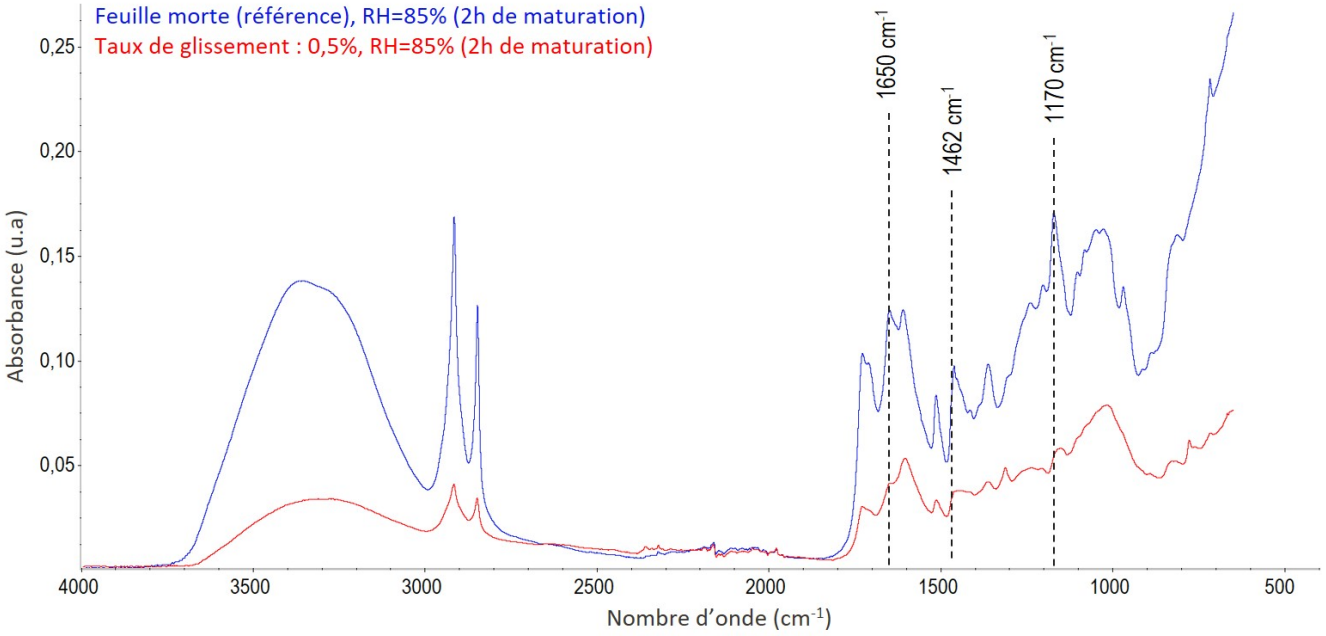
L'énergie nécessairement transmise pour obtenir un facteur de frottement supérieur ou égal aux valeurs mesurées lors d'essais sans feuille dépend du taux de glissement et de l'hygrométrie relative initiale du troisième corps. Néanmoins, pour des taux de glissements égaux à 0.5%, 2% et 2.5% et une hygrométrie relative égale à 85% (pour 2h et/ou 17h de maturation), ces facteurs de frottements ne sont jamais atteints. Pour ces cas, la puissance et l'énergie transmissibles par un troisième corps sont systématiquement inférieures aux valeurs de références (issues d'essais sans feuilles, figures IV.9 et IV.12).

L'obtention des spectres IR des troisièmes corps prélevés après la mesure d'un facteur de frottement maximal au cours d'un essai peut donc permettre de visualiser la présence éventuelle de transformations physico-chimiques par rapport à un état de référence. Une analyse semi-quantitative des spectres IR est réalisée sur des échantillons à même hygrométrie relative. Les spectres associés à plusieurs conditions d'essais pour lesquels les facteurs de frottements de référence ne sont pas atteints sont visibles sur les figures IV.15 et IV.16.

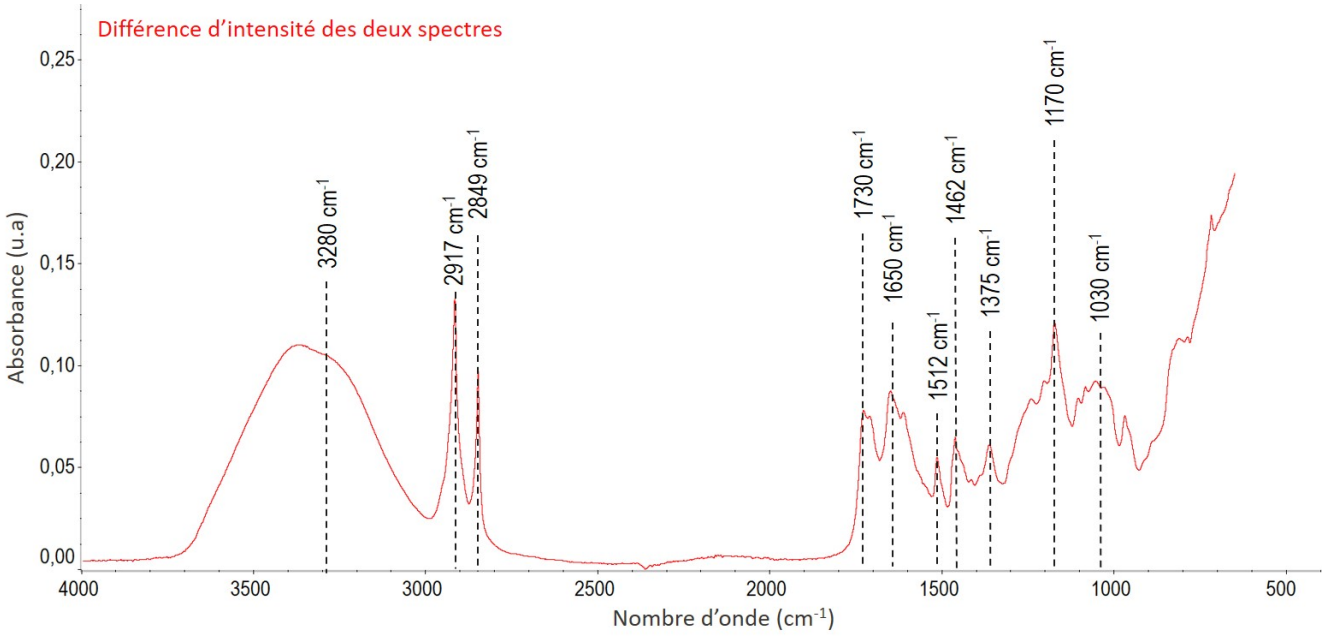
Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

IV.4.2.1 Résultats issus des cas d'études pour lesquels les facteurs de frottement de référence ne sont pas atteint au cours d'un essai

IV.4.2.1.a Spectres infrarouges pour un taux de glissement de 0.5% et une hygrométrie relative de 85% (2h de maturation)



(a)



(b)

FIGURE IV.15 – a) Spectres IR d'échantillons de troisièmes corps externes pour un taux de glissement de 0.5% et une hygrométrie relative égale à 85% (2h de maturation) b) Différence d'intensité des deux spectres.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

La comparaison des spectres IR obtenus pour un taux de glissement de 0.5% et une hygrométrie relative initiale égale à 85% (maturation de 2h) met en évidence un ratio moyen d'intensité de l'ordre de 2 entre ceux-ci. Ce dernier peut être lié à l'assèchement observé des troisièmes corps lors de la réalisation d'essais (éjection de gouttes d'eau en dehors des bandes de contact de la couronne). Ce phénomène peut justifier une réduction de l'intensité de l'ensemble des pics obtenus pour des nombres d'ondes supérieures à 2500 cm^{-1}.

L'analyse des différentes bandes d'absorptions correspondantes à l'empreinte digitale des espèces chimiques étudiées (partie II.2.3) met en évidence une atténuation particulièrement marquée de l'intensité des pics visibles pour des nombres d'ondes listés ci-après :

+ 1730 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CO (après oxydation),
+ 1650 cm^{-1} : vibrations de déformations de la liaison -OH de l'eau libre,
+ 1512 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons C=C,
+ 1462 cm^{-1} : vibrations de déformations des liaisons -CH2,
+ 1375 cm^{-1} : vibrations de déformations des liaisons C-H,
+ 1170 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons C-O-C issue de liens B-glycosidiques,
+ 1030 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CO.

Parmi ces bandes d'absorptions, les différences les plus marquées sont associées aux liaisons réagissant pour des nombres d'ondes égaux à 1730 cm^{-1}, 1650 cm^{-1}, 1462 cm^{-1} et 1170cm^{-1}. La variation d'intensité de la bande correspondant à l'eau libre (1650 cm^{-1}) peut ainsi être corrélée à l'hydratation de l'échantillon analysé. L'application d'un taux de glissement de 0.5% peut être à l'origine de la modification de l'intensité de cette bande.

Cette diminution d'intensité est ainsi à suivre lors de la réalisation de spectres infrarouges afin de potentiellement corréler des changements physico-chimiques des troisièmes corps aux conditions d'essais.

IV.4.2.1.b Spectres infrarouges pour un taux de glissement de 2.5% et une hygrométrie relative de 85% (2h de maturation)

Les données des spectres IR liées à l'utilisation de feuilles dont l'hygrométrie relative est supérieure à 85% (2h de maturation) avec un taux de glissement de 2.5% sont visibles sur la figure IV.16.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

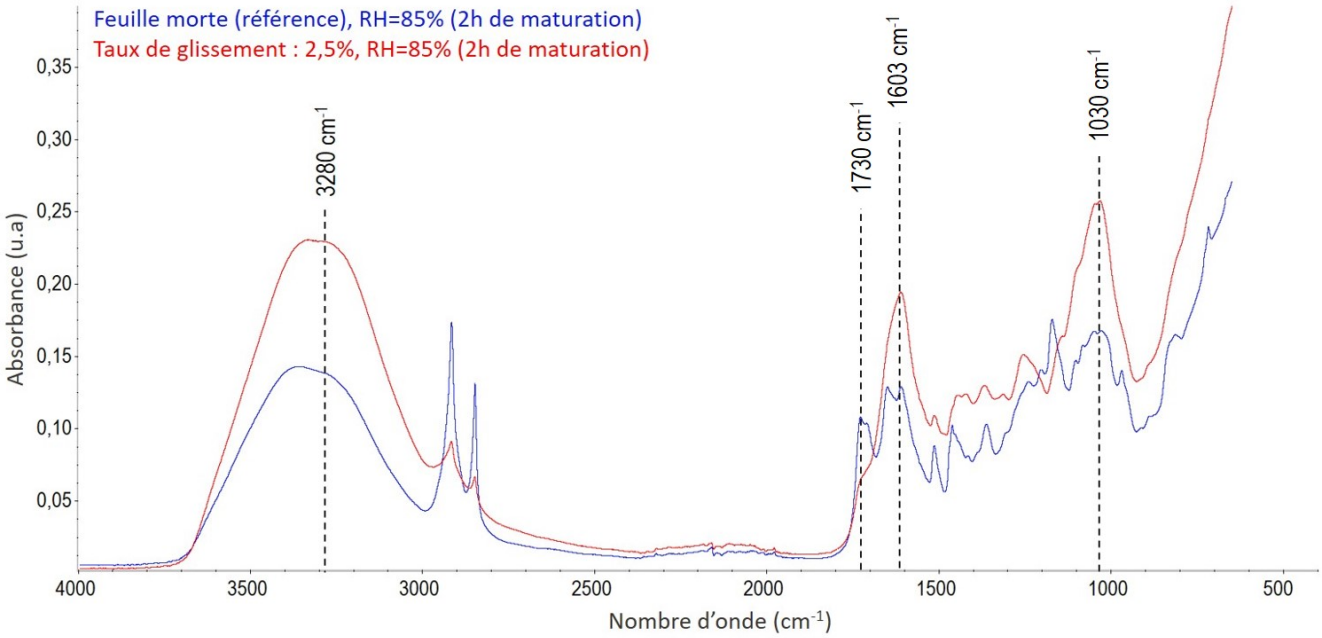


FIGURE IV.16 – Spectres IR d'échantillons de troisièmes corps externes pour un taux de glissement de 2.5% et une hygrométrie relative égale à 85% (2h de maturation).**La différence d'intensité n'est pas tracée car elle ferait apparaître des pics négatifs.**

Le ratio intensité de ces deux spectres sur l'ensemble de la gamme de mesure est cette fois-ci de l'ordre de 1,3. Les vibrations de liaisons -OH relevées pour un nombre d'onde égal à 3280 cm $^{-1}$ réagissent de façon plus importante pour ce cas d'analyse. L'intensité de la bande d'absorption de cette liaison est supérieure à celle de l'échantillon de référence. L'hypothèse d'assèchement évoquée précédemment dans le cas de l'application d'un taux de glissement de 0.5%, basé sur la lecture de l'intensité de cette bande, n'est donc pas vérifiée ici.

De façon semblable à la lecture des données précédentes, plusieurs vibrations de groupes fonctionnels sont atténuées (ou ne sont pas visibles) par rapport aux dernières analyses. Cela signifie donc que les modifications physico-chimiques survenant ne sont probablement pas directement reliées à ces liaisons. Ces phénomènes sont principalement identifiés pour les nombres d'ondes suivants :

+ 1730 cm^{-1} : vibrations d'élongations des liaisons -CO (après oxydation) (aucune visibilité du doublet de pics d'absorption),
+ 1603 cm^{-1} : vibrations de déformations des liaisons -OH (ratio d'intensité relatif au spectre de référence : 1.5),
+ 1030 cm^{-1} : vibrations de déformations des liaisons -CO (ratio d'intensité relatif au spectre de référence : 1.5).

Les spectres IR précédents associés à des variations non-classiques d'adhérence mettent en évi-

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

dence des transformations physico-chimiques. Ces dernières portent principalement sur plusieurs groupes fonctionnels reliés aux biomasses utilisées. Afin de compléter ces données, d'autres analyses correspondants à l'obtention de facteurs de frottement identiques pour différentes énergies transmissibles sont détaillées ci-après.

IV.4.2.2 Analyses infrarouges associées à l'obtention d'un même facteur de frottement pour différentes énergies transmissibles (seuil n°2)

Pour des essais avec ou sans feuilles, un même facteur de frottement (seuil n°2) peut être obtenu pour différentes variations d'énergies dissipées par frottement. Elles peuvent être soit jusqu'à 3 fois supérieures aux énergies minimales transmissibles au travers d'un troisième corps, soit être relativement proches (partie IV.3.2).

Ces cas sont principalement rencontrés dans deux situations :

- la première correspond à l'augmentation du temps de maturation pour une hygrométrie relative de 85% et un taux de glissement supérieur ou égal à 1.5% **(cas n°1, partie IV.4.2.2.a)**,
- la seconde est rencontrée pour une série d'essais dont le taux de glissement ou l'hygrométrie relative sont imposés (**cas n°2, partie IV.4.2.2.b**)

.

Ces deux situations permettent d'identifier des similitudes et/ou des différences entre les spectres obtenus caractérisant les différences énergétiques rencontrées.

IV.4.2.2.a Cas n°1 : spectres infrarouges obtenus pour un taux de glissement de 1.5% et une hygrométrie relative de 85% (2h et 17h de maturation)

L'augmentation du temps de maturation pour une hygrométrie relative de 85% semble être prépondérante sur les variations d'adhérence dès lors que les taux de glissements sont égaux à 1.5% (figure IV.12). Ainsi, les spectres IR reliés à ces conditions sont donnés sur la figure IV.17. Les spectres de références (analyses IR de feuilles non introduites sur le banc d'essai) sont ajoutés à cette même figure.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

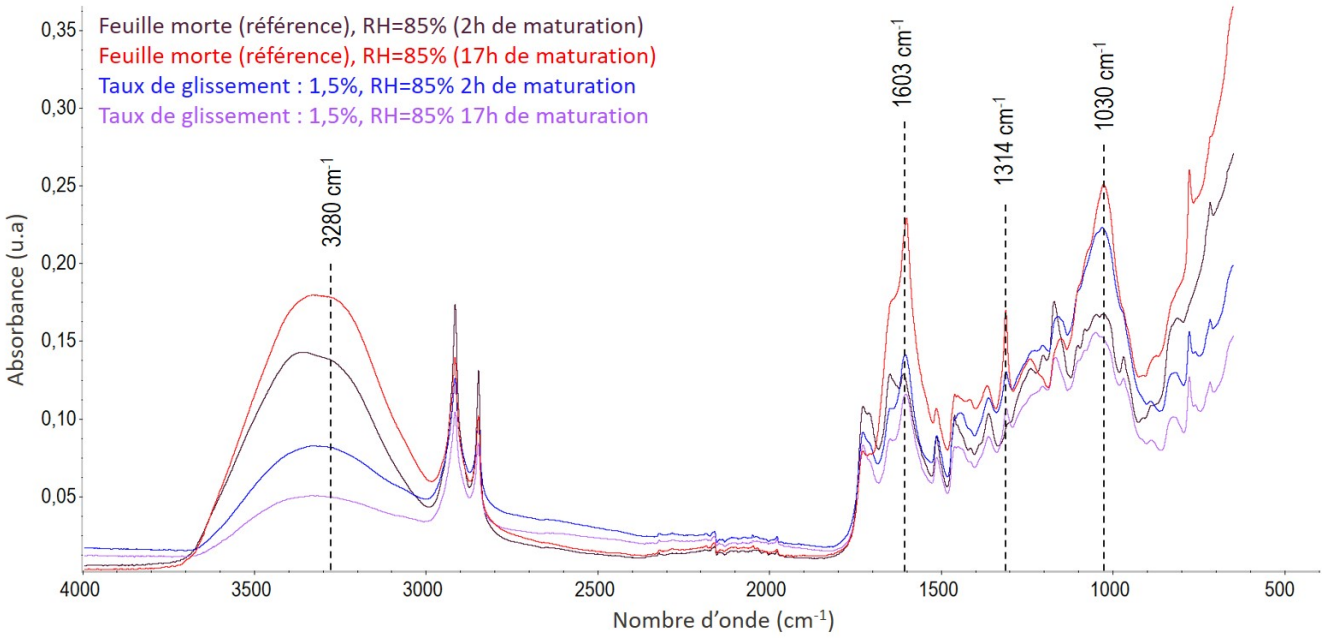


FIGURE IV.17 – Spectres IR d'échantillons de troisièmes corps externes pour un taux de glissement de 1.5% et une hygrométrie relative égale à 85% (2h et 17h de maturation).

Les principales différences visibles à partir de la lecture de ces données spectrales portent encore une fois sur l'intensité des bandes d'absorptions traduisant des vibrations d'élongations des liaisons -OH (3280 cm $^{-1}$). La partie correspondante aux empreintes digitales des spectres (section II.2.3) ne laisse apparaître que d'importants changements d'intensités pour seulement trois nombres d'ondes relevés :

+ 1603 cm^{-1} : vibrations de déformations des liaisons -OH (ratio d'intensité relatif aux mesures spectrales faites pour une même hygrométrie relative : 2.1),
+ 1314 cm^{-1} : combinaisons de vibrations de déformations des liaisons -OH et de vibrations d'élongations des liaisons -CO (ratio d'intensité relatif aux mesures spectrales faites pour une même hygrométrie relative : 2.1),
+ 1030 cm^{-1} : vibrations de déformations des liaisons -CO (ratio d'intensité relatif aux mesures spectrales faites pour une même hygrométrie relative : 1.8 pour RH=85% (17h de maturation) contre 1.3 pour RH=85% (2h de maturation)).

Le calcul de rapports d'intensité remarquables (x1.5, valeur a priori) de plusieurs bandes d'absorptions permet donc d'associer la réalisation d'essais à un taux de glissement donné, à une dégradation physico-chimique de plusieurs liaisons constituants les prélèvements analysés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

IV.4.2.2.b Cas n°2 : spectres infrarouges obtenus pour une série d'essais à taux de glissement (1.5%) imposé et une autre pour une hygrométrie relative imposée (85%, 2h de maturation)

Un facteur de frottement supérieur ou égal aux valeurs de références peut être relié à de mêmes variations d'énergies dissipées par frottement (partie IV.3.2). Ce phénomène est observé pour une série d'essais soit à taux de glissement constant (figure IV.18), soit pour une hygrométrie relative constante (figure IV.19).

Le but de cette section est de déterminer si la comparaison d'une série de spectres IR pour des conditions initiales imposées, est pertinente pour illustrer l'influence de changements physico-chimiques sur l'énergie transmissible par un troisième corps.

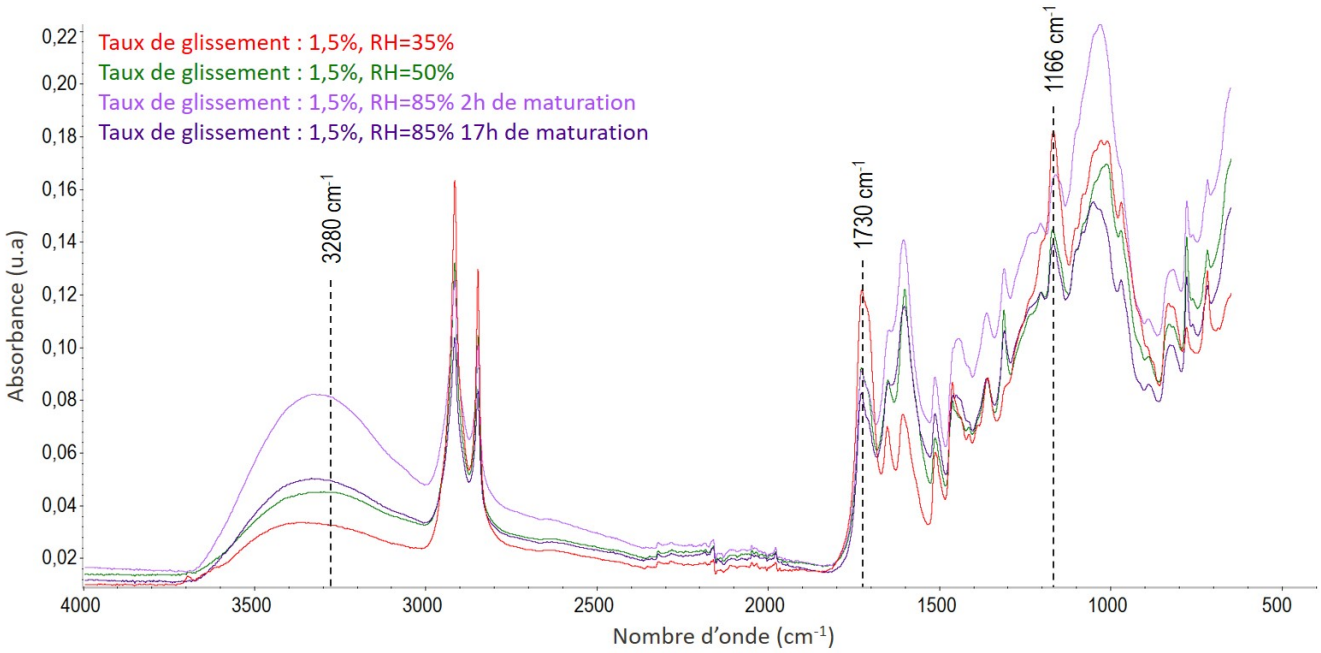


FIGURE IV.18 – Spectres IR d'échantillons de troisièmes corps analysés issus d'une campagne d'essais à taux de glissement constant (1.5%) pour l'ensemble des valeurs d'hygrométrie relatives.

Pour un taux de glissement constant, les enveloppes maximales des spectres sont associées à des troisièmes corps externes dont l'hygrométrie relative est de 85% (2h de maturation). Ce résultat est valable pour la quasi-totalité des bandes d'absorptions visibles sur la gamme de nombres d'ondes analysée. Seules les bandes liées à des nombres d'ondes égaux à 1730 cm^{-1} (vibrations d'élongations de liaisons -CO, après oxydation) et 1166 cm^{-1} (vibrations d'élongations des liaisons C-O-C corrélés à des liens B-glycosidiques) ont des intensités supérieures au spectre mentionné. De façon complémentaire les spectres IR relatifs à une hygrométrie relative de 85% (2 heures

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

de maturation) sont donnés sur la figure IV.19. Ces derniers laissent apparaître des phénomènes similaires en termes de vibrations de liaisons chimiques. Les principales différences d'intensité rencontrées le sont pour les nombres d'ondes égaux à :

+ 3280 cm $^{-1}$: vibrations d'élongations des liaisons -OH.
+ 1730 cm $^{-1}$: vibrations d'élongations des liaisons -CO (après oxydation).
+ 1650 cm $^{-1}$: vibrations de déformations de la liaison -OH de l'eau libre.
+ 1603 cm $^{-1}$: vibrations de déformations des liaisons -OH.
+ 1030 cm $^{-1}$: vibrations de déformations des liaisons -CO.

Ces bandes d'absorptions ont des différences d'intensités les plus marquées dans le cas de la réalisation d'essais à fort taux de glissement. Pour ce cas d'hygrométrie, l'augmentation du glissement semble ainsi prépondérante dans l'activation de transformations physico-chimiques des troisièmes corps.

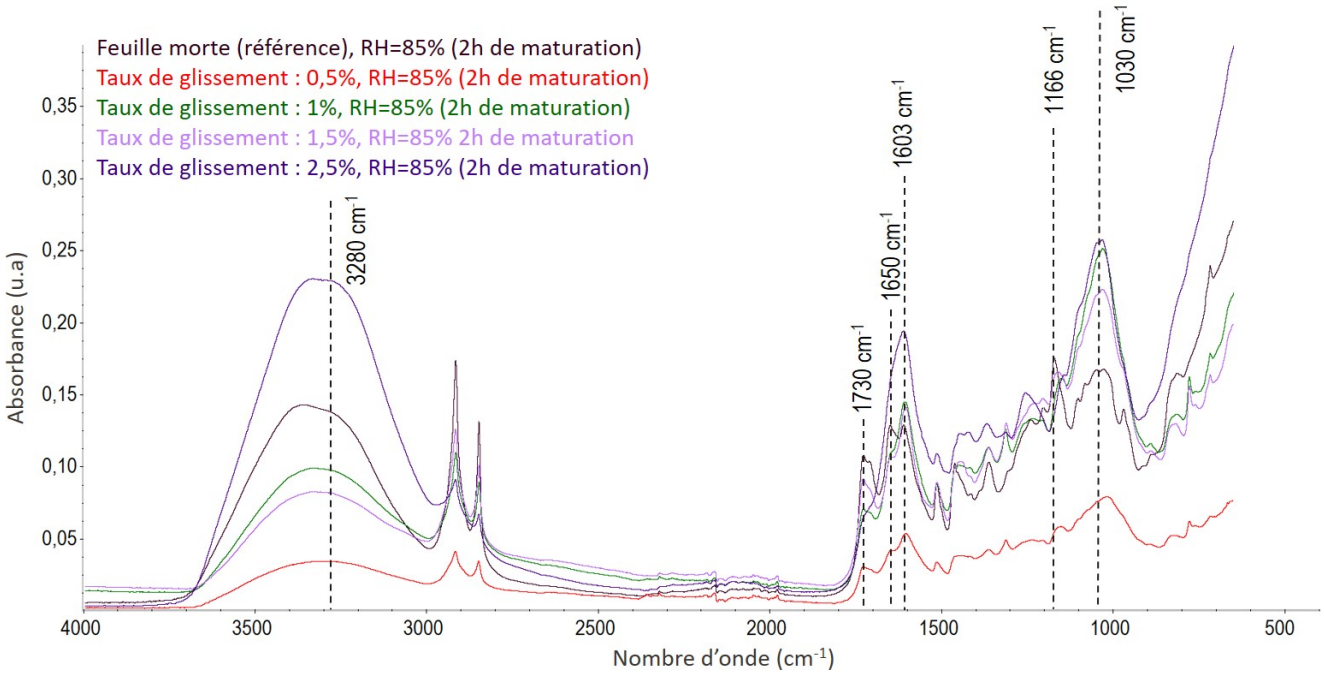


FIGURE IV.19 – Spectres IR d'échantillons de troisièmes corps analysés issus d'une campagne d'essais à hygrométrie relative constante (85%, 2 heures de maturation).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

IV.4.2.3 Discussion générale associées à la réalisation d'analyses par spectrométrie infrarouge

Les analyses spectrométriques de troisièmes corps externes prélevés après essais sur Triboring à la surface des pièces en contact, mettent en évidence plusieurs différences et similitudes. Cette section vise à présenter les résultats obtenus grâce à l'ensemble des analyses IR réalisées. L'influence de l'hygrométrie relative initiale et du taux de glissement appliqué sur les modifications physico-chimiques du troisième corps sont synthétisés ci-après.

Effets de l'hygrométrie relative, du temps de maturation, et du taux de glissement, sur les modifications physico-chimiques rencontrées par un troisième corps

La modification de l'hygrométrie relative du troisième corps influe sur les variations des grandeurs mécaniques mesurées au plus près du contact (efforts et facteur de frottement associé). L'analyse par spectroscopie IR d'échantillons de feuilles n'ayant pas subies de sollicitations tribologiques révèle des modifications physico-chimiques de plusieurs liaisons composant la biomasse étudiée. Elles sont mises en évidence via des bandes d'absorptions dont l'intensité varie avec l'hygrométrie relative pour un nombre d'onde donné. Ces bandes sont principalement associées à des nombres d'ondes correspondants à des vibrations de liaisons oxygène-hydrogène et carbone-carbone. Il n'est ici pas possible avec cette technique d'analyse de donner avec certitude la macromolécule réagissant à ces changements d'hygrométrie relative initiale. Ces derniers peuvent néanmoins être considérés à l'origine des transformations physico-chimiques survenant au cours d'un essai.

De la même façon, il a été possible d'illustrer l'apparition de transformations physico-chimiques associées à l'augmentation du temps de maturation d'un troisième corps externe. Cela est mis en évidence avant leur introduction dans le contact. L'augmentation de ce temps est relié principalement à l'intensité des bandes d'absorptions dont les nombres d'ondes relevés sont égaux à 1603 et 1030 cm^{-1}. Elles sont liées à des vibrations de déformations des liaisons -OH et à des vibrations d'élongations des liaisons -CO. La variation d'intensité des bandes associées à ces nombres d'ondes a pu être considérée comme un marqueur fort de transformations physico-chimiques. Cet élément est aussi retrouvé lors de la réalisation d'essais à un taux de glissement donné.

Dans ce dernier cas, les différents niveaux d'hygrométrie relative initiale du troisième corps externe apportent des informations supplémentaires. Ces derniers permettent de mettre en évidence des différences d'intensités de bandes d'absorptions particulièrement marquées pour des hygrométries égales à 85%.

Par ailleurs, des analyses infrarouges de troisièmes corps externes sont réalisés pour des cas où les facteurs de frottement de références ne sont jamais atteints. Les principaux résultats de ces

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

analyses permettent d'identifier des variations d'intensité de l'ensemble des bandes d'absorptions relatives aux essais de référence de l'ordre de 1.5 points en moyenne. Cette valeur peut ainsi être corrélée à une diminution (lorsque le ratio est inférieur à 1) ou une augmentation (lorsque le ratio est supérieur à 1) des modifications physico-chimiques reliées à l'activation des liaisons des groupements sollicités.

De façon similaire, le fait d'imposer un taux de glissement constant permet d'obtenir des spectres infrarouges comparables (en termes de présence et intensité des bandes d'absorptions) pour l'ensemble des conditions d'hygrométries relatives. De nouveau, seules les bandes associées à des liaisons faisant intervenir des atomes d'oxygènes (et dans une moindre mesure des liaisons carbone-oxygène et oxygène-hydrogène) diffèrent en intensité lors de la comparaison des spectres obtenus. Ces deux notions illustrent ainsi de façon simple les conséquences d'un changement d'hygrométrie sur la physico-chimie du troisième corps.

Pour une hygrométrie relative fixée, tous les résultats d'analyses infrarouges ont permis de montrer que le taux de glissement modifie la réponse spectrale des échantillons étudiés (figure IV.19). Ces réponses différentes permettent de mettre en évidence une activation ou une dégradation des différentes liaisons chimiques relevées.

Les notions de couplages mécanique et physico-chimiques associées aux variations d'adhérence sont ainsi justifiées grâce à l'ensemble de ces données obtenues. La modification de la physico-chimie d'un troisième corps externe est donc directement reliée à son hygrométrie relative.

L'application d'un taux de glissement fixé au contact influe sur le type de liaisons chimiques réagissant lors des analyses spectrales. Ces dernières laissant paraître des différences communes pour l'ensemble des spectres obtenus ; portant sur des liaisons faisant intervenir des atomes d'oxygènes.
L'ajout d'oxygène dans un environnement de contact composé d'un troisième corps externe de type feuilles mortes pourrait ainsi modifier la physico-chimie du troisième corps et par conséquent l'adhérence du contact rail-roue.
Cette hypothèse a par ailleurs été formulée par Olofsson et Sundvall [138] à la suite d'analyses effectuées par spectrométrie à décharge luminescente de troisièmes corps organiques. ces derniers étant créés à l'aide d'un tribomètre de type pion-disque, pour différentes hygrométries relatives. Ces auteurs ont pu identifier une présence majoritaire d'oxygène dans les couches de troisième corps formées pour une hygrométrie relative élevée (RH>80%).
Ils suggèrent à la suite de ces analyses physico-chimiques l'idée selon laquelle, les niveaux d'adhérence diminuent lorsque que l'hygrométrie relative du troisième corps augmente. Cet élément est justifié par le fait que l'augmentation de l'épaisseur de la couche de troisième corps formée augmente la quantité d'oxygène présente sur leurs surfaces. Ce résultat vient ainsi corroborer les

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

mécanismes de perte d'adhérence proposés par Ishizaka au cours du chapitre II.

Enfin, il est aussi important de rappeler que la réalisation d'analyses spectrales (ici par spectroscopie infrarouge) est limitée pour nos conditions d'étude. L'emploi de cette technique permet dans le cadre de cette thèse, de ne réaliser uniquement que des analyses semi-quantitatives portant sur la mise en évidence de réactions physico-chimiques survenues sur un échantillon. L'utilisation de moyens d'analyse physico-chimiques complémentaires sera abordé au cours de la conclusion générale de ce manuscrit.

IV.5 Conclusions

L'ensemble des conditions d'essais choisies permettent d'influer sur deux paramètres clés issus d'un retour d'expérience industriel technique, et d'une analyse de l'état de l'art scientifique : hygrométrie relative des troisièmes corps externes et taux de glissement appliqué au contact.

Ces paramètres sont étudiés sur respectivement 4 et 5 niveaux. La reproduction d'une perte d'adhérence a pu être obtenue pour l'ensemble des conditions d'essais testées. Ces variations d'adhérence servent aussi à définir 5 régions au cours desquelles le facteur de frottement évolue de façon monotone (baisse, hausse, stabilisation). Le schéma visible sur la figure IV.20 illustre cette idée.

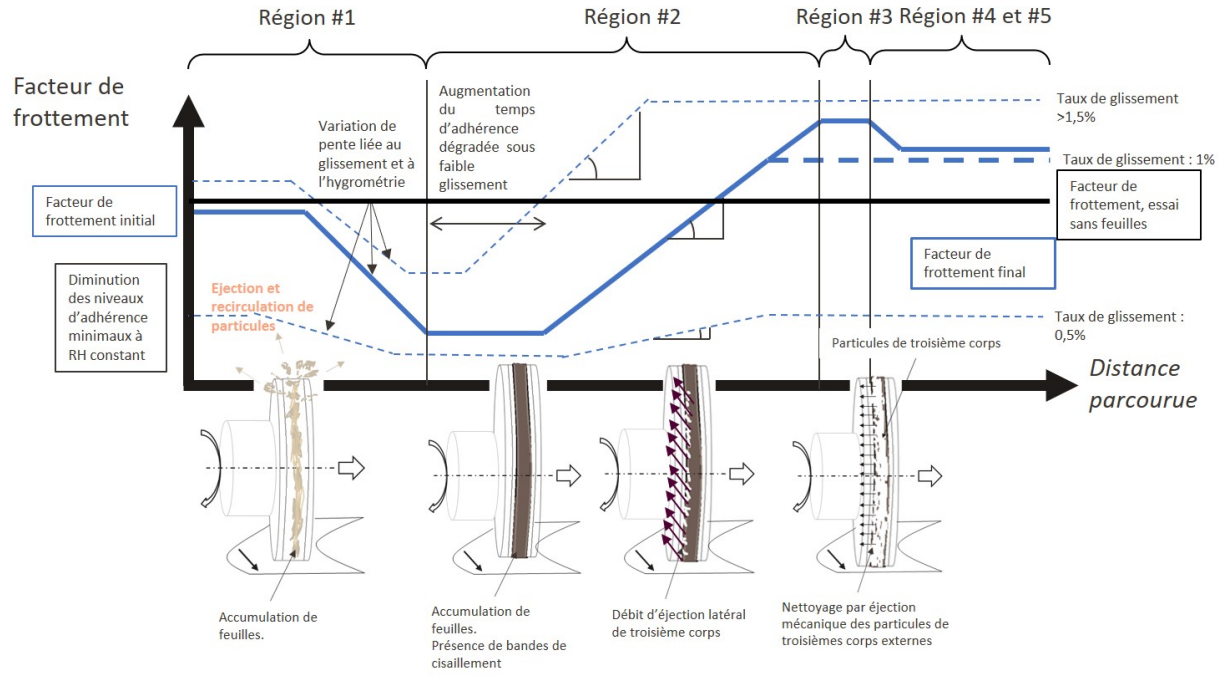


FIGURE IV.20 – Schématisation de l'évolution de l'adhérence du contact rail-roue reproduit sur le banc Triboring en présence d'un troisième corps externe de type "feuille morte".

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

La validation du fonctionnement du banc Triboring sans troisième corps externe a pu être effectuée pour différents taux de glissements appliqués au contact. Les facteurs de frottement mesurés au cours de ces essais sont constants dès lors que les taux de glissements sont inférieurs aux limites d'activations de logiciels d'anti-patinage (ici, 2%). Au-delà, une usure des galets utilisés liée à l'augmentation des taux de glissements est mise en exergue.

Le respect des circuits tribologiques existants pour un contact rail-roue réel sur le banc Triboring a ainsi pu permettre de réaliser des essais de caractérisation de l'adhérence du contact rail-roue ; et ce de façon fidèle d'un point de vue tribologique.

L'ajout de feuilles au contact va permettre de reproduire des variations du facteur de frottement mesurées pour un taux de glissement imposé et contrôlé au travers d'une boucle d'asservissement sur Triboring. Les variations globales mesurées pour une grande partie des essais suivent les tendances obtenues et décrites lors de l'utilisation de logiciels de type anti-patinage à glissement contrôlé (mentionné au cours du chapitre II, figure II.9).

Ainsi, pour un taux de glissement donné, un facteur de frottement minimum sera liée tant aux variations mécaniques d'efforts et de vitesses (à une moindre échelle) mesurées au plus près du contact, qu'aux transformations physico-chimiques survenues au sein des troisièmes corps. Ces changements physico-chimiques surviennent dès lors que l'hygrométrie relative des feuilles mortes utilisées est modifiée. Ils sont aussi modulés par l'application d'un taux de glissement non nul au contact.

Ce dernier permet de mettre en évidence la notion de sollicitation d'adhérence au travers d'une transmission d'énergie dissipée par frottement. En effet, les résultats issus de l'analyse paramétrique de ce chapitre ont permis d'illustrer le fait qu'un même niveau d'adhérence pouvait être obtenu pour différentes énergies. Ces énergies sont dissipées par frottement et ainsi transmises par le troisième corps formé au cours de la vie du contact aux premiers. Ces variations d'adhérence dépendent ainsi du couplage mécanique, énergétique, et physico-chimique existant au sein du contact.

Les couplages mécaniques et physico-chimiques mis en évidence au cours de ce chapitre permettent d'aboutir à deux évolutions du facteur de frottement.
Dans un premier cas, cette grandeur suit l'évolution classique présentée sur la figure IV.20. L'adhérence au contact, mesurée au travers des variations du facteur de frottement, est influencée tant par l'application de sollicitations mécaniques liées aux conditions de contact, que par les différentes transformations physico-chimiques subies par le troisième corps. Ce cas sert aussi à définir un facteur de frottement limite issus d'essais sans feuilles.
Dans un second cas, le facteur de frottement ne parvient jamais à dépasser de façon permanente les limites obtenues lors d'essais sans feuilles. Ce phénomène n'est néanmoins observé que lorsque la dégradation physico-chimique des troisièmes corps externes est exacerbée pour une hygromé-

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

trie relative égale à 85%, et ceci, pour des temps de maturation de 2h et de 17h. Les variations d'adhérence du contact semblent ici être associées de façon prédominantes à la dégradation physico-chimique du troisième corps. Cette hypothèse devrait cependant être appuyée par la réalisation d'analyses spectrales complémentaires de type spectroscopie RMN (caractérisation de la structure des chaînes carbonées) ou encore par spectroscopie UV visible (mise en évidence des systèmes conjugués, et/ou les oxydes métalliques) qui n'ont pu être réalisées à l'échelle de ces travaux de thèse.

De plus, les variations d'hygrométrie et de taux de glissement influent sur l'étalement du troisième corps. Ce dernier est lié à une modification des débits de recirculations longitudinaux, accentués notamment pour une hygrométrie relative de 85%. Cette activation de débit a pour conséquence d'allonger les distances nécessaires à la reprise d'adhérence en présence de feuilles mortes. L'augmentation de l'hygrométrie tend alors à générer un troisième corps compact et cohésif. Pour ce dernier, il est possible d'identifier les constituants d'une feuille dont la structure physique est dégradée (stomates fissurés, limbes et nervures cisaillées).
Pour ce type de troisième corps, aucune particule d'usure n'a pu être retrouvée en surface des pièces en contact. Il peut donc potentiellement avoir tendance à limiter l'usure des premiers corps au détriment de la dégradation de sa structure organique. Cette dégradation est effective dès qu'un taux de glissement non-nul est appliqué au contact.
A contrario, la diminution de l'hygrométrie relative tend cette fois-ci à la création d'un troisième corps peu cohésif accentuant la génération d'usure par frottement des premiers corps au contact. Cette dernière étant exacerbée par l'application de taux de glissements supérieures ou égaux à 2%.

D'un point de vue de sa structure et de sa composition, les principaux constituants des troisièmes corps externes (stomates, nervures, limbes) ont été retrouvés sous différentes formes lors de la réalisation de l'ensemble des essais effectués. Ces éléments contribuent donc à l'évolution de l'adhérence du contact rail-roue.
Ces données renforcent ainsi l'idée que la conservation de la structure physique initiale des troisièmes corps est indispensable à la réalisation d'essais d'adhérence réalistes sur banc.

En outre, la caractérisation énergétique de l'évolution des facteurs de frottement au cours d'un essai a permis de définir la notion d'adhérence latente maximale (partie III.2.4.2.b) obtenue par sollicitation en glissement des troisièmes corps. Cette notion est associée au fait que pour atteindre un facteur de frottement maximum, différentes quantités d'énergies peuvent/doivent être transmises au travers du troisième corps selon les conditions cinématiques et d'hygrométries imposées. Cette notion peut ainsi servir de base au démarrage d'une étude visant à optimiser les conditions permettant d'accélérer la reprise d'adhérence d'un contact rail-roue. **Cette dernière est d'autant plus rapide lorsque l'énergie liée à l'obtention d'un facteur de frottement maximal est petite.**

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Ces valeurs énergétiques dépendent aussi de façon simultanée des sollicitations mécaniques appliquées au contact ainsi qu'aux modifications physico-chimiques survenues au sein du troisième corps.

Cette analyse paramétrique a donc permis de valider la reproduction de phénomènes d'adhérence dégradée en imposant des sollicitations mécaniques et un état physico-chimique initialement contrôlé d'un troisième corps externe. Ce travail est effectué à l'aide d'outils pluridisciplinaires (tribologie, mécanique, chimie) couplant obtention de données expérimentales à des analyses tribologiques et physico-chimiques.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Conclusions générales et perspectives

Conclusions générales

Le développement des modes de transports ferroviaires contribue à la réduction des émissions de gaz à effets de serre [10]. Pour cela, il est nécessaire de maîtriser les fonctionnalités associées au contact rail-roue. Parmi ces dernières, le contrôle de l'adhérence d'un train permet d'assurer dans des conditions nominales la sécurité et la régularité d'une circulation.

L'étude des variations d'adhérence nécessite à la fois des investigations sur site, et expérimentales en laboratoire. À ce titre, l'analyse de données industrielles sert à identifier les principales causes à l'origine d'un incident. Ces dernières sont reliées à la présence de troisièmes corps externe d'origines artificielle et/ou naturelle ainsi qu'aux conditions cinématiques appliquées au contact. L'étude des variations d'adhérence nécessite alors l'emploi d'outils tribologiques conceptuels (triplet et circuits tribologiques).

L'état de l'art réalisé a mis en évidence le rôle critique du troisième corps vis-à-vis de la modulation de l'adhérence au contact. Cette dernière est ainsi principalement impactée par la présence de feuilles mortes et ceci pour différentes hygrométries relatives. Ce troisième corps externe d'origine naturelle a fait l'objet d'études mécaniques et physico-chimiques. Les premières visent à caractériser l'adhérence d'un contact reproduit sur banc d'essai à différentes échelles. Les secondes ont quant à elle permis d'identifier des conditions tribologiques nécessaires à la création et à l'adhésion d'un troisième corps sur la surface des rails dégradant l'adhérence.
Parmi l'ensemble des études réalisées, toutes convergent vers le fait que l'adhérence d'un contact rail-roue doit être traitée au travers d'un couplage tribologique mécanique, et physico-chimique.

Plus généralement, les travaux présentés dans ce manuscrit ont permis de répondre à quatre objectifs visant à compléter les travaux actuels :

1- Respecter le circuit tribologique associé au contact rail-roue au travers d'un choix pertinent de banc d'essai.
2- Coupler les résultats d'études mécaniques à des analyses physico-chimiques *ex-situ* des troi-

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

sièmes corps obtenus après essais.

3- Proposer des critères d'évolution d'une perte d'adhérence basés sur l'étude tribologique des troisièmes corps créés sur banc.

4- Formuler des propositions visant à réduire les effets d'une perte d'adhérence à la suite du passage sur une couche de troisième corps organique.

Chapitre II :

Le chapitre 2 a permis de répondre aux deux premiers objectifs. L'étude de l'adhérence passe par le choix d'un banc d'essai s'approchant au plus près des circuits tribologiques. Dans le cadre de ces travaux de thèse, le tribomètre de type galet sur anneau Triboring répond à ce besoin. Il permet de reproduire un contact rail-roue à une échelle 1/15ème avec des circuits tribologiques réalistes. Il permet aussi de s'approcher du pilotage réél en glissement imposé appliqué à ce même contact.

La collecte de troisièmes corps issus d'études préliminaires de terrain et leurs analyses physico-chimique contribuent à répondre au second objectif. Ces résultats sont utilisés pour obtenir des éléments de référence devant être retrouvés post-essais. Parmi eux, la dégradation mécanique et physico-chimique de la structure d'une feuille en fait partie. Un materiau pseudo-composite fibreux constitué d'une matrice végatale formée par le limbe d'une feuille et renforcé par ses nervures est retrouvé après une perte d'adhérence. Les constituants d'une feuille morte (limbe, nervure, stomate) voient aussi leur structure mécanique dégradée en raison des contraintes et pressions appliquées au contact. Les stomates sont ainsi fissurées, les limbes et nervures sont cisaillés.

Les éléments mentionnés dans ce chapitre ont aussi permis de caractériser à l'aide d'analyses spectroscopiques (IR et EDX) les différents polymères constituants une feuille morte (cellulose, pectine, lignine, et hémicelluloses). Cela permettant de réaliser des analyses comparatives physico-chimiques entre un troisième corps obtenu expérimentalement, et un autre réél.

Chapitre III :

La campagne d'essais expérimentale présentée dans ce chapitre a permis de répondre au troisième objectif de travail. Pour cela, la vérification de la reproductibilité des essais en présence d'un troisième corps externe initialement connu est faite. Ces données servent à quantifier des incertitudes de mesure et à mettre en évidence des variations d'adhérence monotones.

Le tracé du facteur de frottement en fonction de la distance parcourue a fait apparaître un minimum, un maximum, et une asymptote. Grâce à l'analyse de données vidéos, ces éléments ont pu être reliés à l'activation de plusieurs débits tribologiques. Parmi eux, l'activation du débit de recirculation longitudinal illustre la notion de transport de troisième corps. Ce phénomène est identifié au travers des variations cycliques du facteur de frottement. Il sert notamment à expliciter la répartition des zones à faible adhérence rencontrées par le contact.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

L'utilisation de grandeurs énergétiques est utilisé pour compléter l'analyse des données mécaniques obtenues. La caractérisation de la capacité du troisième corps à être mobilisé pour faciliter une transmission d'énergie mécanique entre les premiers est faite. En effet, la présence de zones de glissement et d'adhérence au contact est à l'origine d'une dissipation d'énergie par frottement. Le troisième corps formé peut alors transmettre différentes quantités d'énergies aux premiers en liens avec une variation donnée d'adhérence. L'adhérence mesurée au contact peut être caractérisée par une quantité d'énergie transmissible par le troisième corps nécéssaire pour atteindre un facteur de frottement seuil minimum, maximum ou stabilisé.
Pour chacun de ces seuils, l'observation *ex-situ* (par MEB) de la morphologie des troisièmes corps révèle une modification de la structure des feuilles. L'application d'un taux de glissement non nul dégrade leurs principaux constituants (stomates, nervures, limbes). De plus, l'analyse IR de ces troisièmes corps met en évidence une dégradation de la structure physico-chimique des polymères associés. Ces résultats sont ainsi cohérents avec ceux du chapitre II. Ainsi, grâce à des analyses semi-quantitatives par spectroscopie IR, l'activation ou la dégradation de liaisons chimiques en lien avec une variation d'adhérence est caractérisée. Ces résultats confirment aussi que pour réaliser des essais d'adhérence réalistes, la structure des feuilles (troisième corps externe) ne doit pas être détériorée. Dans le cas contraire, les couplages mécaniques et physico-chimiques et donc la réponse tribologique seront modifiés.

Chapitre IV :

L'étude paramétrique réalisée au cours du chapitre IV a permis de répondre au quatrième objectif de ce travail de recherche. Les variations d'hygrométrie relative et les différents taux de glissement contribuent à modifier le déroulement d'une perte d'adhérence. Les résultats expérimentaux montrent que des variations répétables peuvent être obtenues pour différentes conditions d'essais initiales. Le calcul du facteur de frottement sert à identifier différents extremum dépendant des paramètres d'entrées. L'évolution de cette grandeur suit alors des tendances similaires à celles décrites au cours du chapitre III. Cependant, pour certaines conditions d'hygrométrie et de glissement, ces variations ne sont pas retrouvées. Les débits tribologiques identifiés ne sont alors plus activés aux mêmes moments. Cela est particulièrement valable lors de l'utilisation d'un troisième corps dont l'hygrométrie relative est élevée (85%).

Celle-ci initie les transformations physico-chimiques subies par un troisième corps organique. La réalisation d'analyses IR de feuilles non introduites au contact a permis de mettre en évidence une dégradation de plusieurs liaisons chimiques identifiées lors de la réalisation de l'état de l'art. Leur introduction au contact permet de générer des sollicitations mécaniques et tribologiques couplées à des changements physico-chimiques. En présence de feuilles au contact, le facteur de frottement mesuré fait alors l'objet de deux types de variations.
Dans un premier cas, il peut être supérieur à celui issu d'essais sans feuilles. L'activation des débits

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

de recirculation et d'éjéction contribue alors à ce phénomène.
Dans un second cas, les sollicitations tribologiques initiales ne permettent pas d'obtenir une grandeur supérieure à celle issue d'essais sans feuilles. L'augmentation de l'hygrométrie relative et des temps de maturation du troisième corps contribuent de façon couplée à la dégradation physico-chimique des structures organiques et aux types de variations d'adhérence rencontrées.

Plus généralement, l'analyse IR de troisièmes corps *ex-situ* complète les résultats obtenus après celles des grandeurs mécaniques. L'activation et la dégradation de liaisons chimiques contenant des atomes d'oxygène sont identifiées lors de la transition entre le début d'un essai et la mesure d'un facteur de frottement maximal. Les variations d'adhérence sont alors principalement corrélées aux modifications physico-chimiques subies initialement par le troisième corps. La modification d'intensité de bandes IR reliées, selon différents résultats bibliographiques, aux macromolécules de cellulose, lignine et hémicelluloses pour différentes conditions d'essais initiales appuie ce fait.
La diminution de l'hygrométrie relative tend à la création de troisièmes corps peu cohésifs accentuant la génération de débris d'usure. Son augmentation tend au contraire à produire un troisième corps compact et cohésif pouvant avoir tendance à limiter l'usure des premiers. Les différentes morphologies observées sont reliées aux seuils énergétiques définis. Ils servent notamment à répondre au quatrième objectif de travail. Ils permettent d'identifier les conditions d'essais initiales minimisant les énergies transmissibles au travers d'un troisième corps pour obtenir un facteur de frottement nominal. Ce dernier élément sert ainsi à caractériser la capacité d'un troisième corps à être mobilisé pour faciliter une transmission d'énergie mécanique d'un corps en mouvement (roue) à un autre fixe (rail).

Perspectives

Ces travaux de thèse ouvrent de nombreuses perspectives à court, moyen et long termes.

Objectifs à court termes

Modulation en temps réel du taux de glissement

La démarche d'étude tribologique suivie durant ces travaux a été appliquée sur la base d'essais "Triboring". Ce dernier permet notamment de reproduire un pilotage en glissement imposé rencontré sur un train.
Afin de se rapprocher du fonctionnement des logiciels d'anti-patinage, une évolution du pilotage du banc peut être envisagée. Cette dernière peut consister en l'implémentation d'un taux de glissement adaptatif dépendant des efforts mesurés au contact. Le but est alors d'optimiser les paramètres

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

d'entrée liés à l'asservissement cinématique et réduire l'influence d'une perte d'adhérence sur la mise en mouvement d'un train.

Une modulation du contrôle du taux de glissement appliqué au contact peut aussi servir à reproduire le passage d'une circulation composée d'une locomotive (pilotée en glissement) et de ses wagons (roulement sans glissement). Les résultats obtenus sur les deux derniers chapitres de cette thèse pouvant ainsi être généralisés pour le fonctionnement de différents types de trains.

Modification du banc d'essais Triboring

L'état de l'art réalisé au cours de cette thèse à mis en évidence plusieurs troisièmes corps modifiant l'adhérence du contact rail-roue (sable, eau, graisse...). L'utilisation d'une seconde cellule tribologique sur Triboring peut servir à étudier les couplages mécaniques et physico-chimiques liés à l'ajout combiné de ces troisièmes corps. Ces modifications du banc serviront alors à quantifier les débits tribologiques reliés aux variations d'adhérence.

Prise en compte de la diversité biologique des espèces

La campagne d'essais paramétriques réalisée au cours de cette thèse est focalisée sur l'utilisation de feuilles de platane. Cette espèce est considérée par SNCF Réseau comme étant responsable de nombreuses pertes d'adhérence.
Plusieurs autres espèces (chêne, robinier. . .) sont aussi retrouvées après un enrayage ou un patinage. Par conséquent, la prise en compte de la diversité biologique existante modifie très probablement les couplages mécaniques et surtout physico-chimiques identifiés. L'application de la démarche d'étude suivie dans cette thèse pour différentes espèces organiques permet alors de quantifier une perte d'adhérence pour n'importe quel type de feuilles.
Ces résultats pourront notamment alimenter une campagne d'ensemencements choisis visant à réduire le nombre de retards liés à une adhérence dégradée.

Objectifs à moyens termes

Détermination des mécanismes tribochimiques en lien avec l'adhérence du contact rail-roue en présence d'un troisième corps organique

Les outils d'analyses physico-chimiques utilisés au cours de cette thèse ont mis en évidence des modifications de composition chimique d'un troisième corps organique. Les travaux récents de Bringel [54] et Ishizaka [105] donnent des clés de lecture des mécanismes tribochimiques liés à l'adhésion du troisième corps à la surface d'un rail.

Ainsi, coupler l'utilisation d'un banc d'essais représentatif d'un contact rail-roue (d'un point

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

de vue matériaux et cinématique) à des techniques de caractérisation physico-chimiques avancées permettra d'effectuer une synthèse de l'ensemble des travaux réalisés.

Parmi ces techniques d'analyses, l'observation par microscopie photonique et électronique des premiers et troisième corps peut servir à identifier des modifications de leurs morphologies pour différents variations d'adhérence.

En sus des classiques analyses morphologiques en microscopie photonique et électronique, des analyses de troisièmes corps par (RMN) du liquide (1H/13C) peuvent être réalisées. Ces derniers permettront de décrire des molécules organiques complexes retrouvées dans le troisième corps étudié (cellulose, lignine, hémicellulose). Cette méthode est complétée par des analyses RMN du solide (13C) détaillant la dégradation des biopolymères d'une feuille. La détermination de la structure moléculaire des biomasses peut être complétée par spectroscopie Raman et Infrarouge. Ces méthodes d'analyses seront utilisées pour caractériser l'impact des conditions d'essais appliquées au troisième corps organique sur les modifications physico-chimiques subies pour différents facteurs de frottement.

Ces techniques d'analyses peuvent enfin être complétées par des méthodes spectroscopiques de type décharge luminescente (Glow Discharge Optical Emission) ou fluorescence des rayons X. La première est un procédé d'analyse élémentaire utilisé pour suivre la composition chimique d'un matériau en fonction de sa profondeur. La seconde sert à déterminer globalement les éléments et leurs concentrations dans un échantillon. Ces deux techniques sont adaptées à l'étude de la composition physico-chimique de la surface d'un premier corps composé d'une couche organique. Le couplage de données tribologiques, mécaniques, et physico-chimiques pourra alors servir à identifier les voies de transformations priviligiées (mécanique ou physico-chimiques) par les troisièmes corps au contact pour une variation d'adhérence donnée.

Objectifs à long termes

Développement d'un modèle numérique alimenté par des données expérimentales

L'étude de l'adhérence d'un contact rail-roue s'effectue au travers d'approches globales, et locales expérimentales. Le développement récent de méthodes numériques granulaires peut servir à caractériser les circuits tribologiques reliés à des variations d'adhérence.
Ainsi, la description expérimentale d'un troisième corps pourrait être complétée par la création de modèles numériques alimentés par des essais expérimentaux.
Les variations de paramètres divers (température, rugosité, pression, taux de glissement...) pourront alors être pris en compte.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Enfin, à plus long termes, la création d'un modèle mixte éléments discrets / éléments finis permettrait de généraliser l'ensemble des données précédentes. Elles sont inhérentes aux couplages tribochimiques identifiés jusqu'à présent, et pourront prendre en compte de l'usure des premiers corps en lien avec l'adhérence d'un contact rail-roue.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexes

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexes

A Description du processus de fabrication d'une roue ferroviaire

Plusieurs industriels (Valdunes, Farinia, Lucchini RS etc..) se partagent le marché de la fabrication d'ensembles d'essieux et de roues ferroviaires. Cette dernière repose sur trois procédés :

- mise en forme via forgeage et laminage,
- réalisation d'un traitement thermique qui confère à la roue des propriétés mécaniques souhaitées,
- usinage et contrôle géométrique de la roue fabriquée.

Ces processus sont explicités ci-après à l'aide de document provenant de deux fabricants européens de roues MG Valdunes et Lucchini RS [139].

Dans un premier temps, des lopins d'aciers à roue correspondant à l'une des nuances données dans la norme NF EN 13262 sont découpés en fonction du diamètre de la roue à fabriquer. Une roue de locomotive BB26000 peut par exemple avoir un diamètre de 1250mm quand l'une de ses remorques peut avoir un diamètre de l'ordre de 940mm.

Ces lopins d'acier sont ensuite chauffés à plus de 1300° puis décalaminés afin de supprimer la couche d'oxyde provenant du chauffage.

Une phase d'ébauchage et de préformage s'ensuit alors. Le lopin est inséré dans une presse ayant une capacité de l'ordre de 6000T à 9000T. Le moyeu est alors percé à l'aide d'une presse d'une capacité de l'ordre de 400T.

Afin d'obtenir la forme de la roue souhaitée, un laminage vertical est réalisé (voir aussi figure 21). Il permet de donner à la roue une forme de toile souhaitée. Cette action marque la fin de l'étape de mise en forme.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

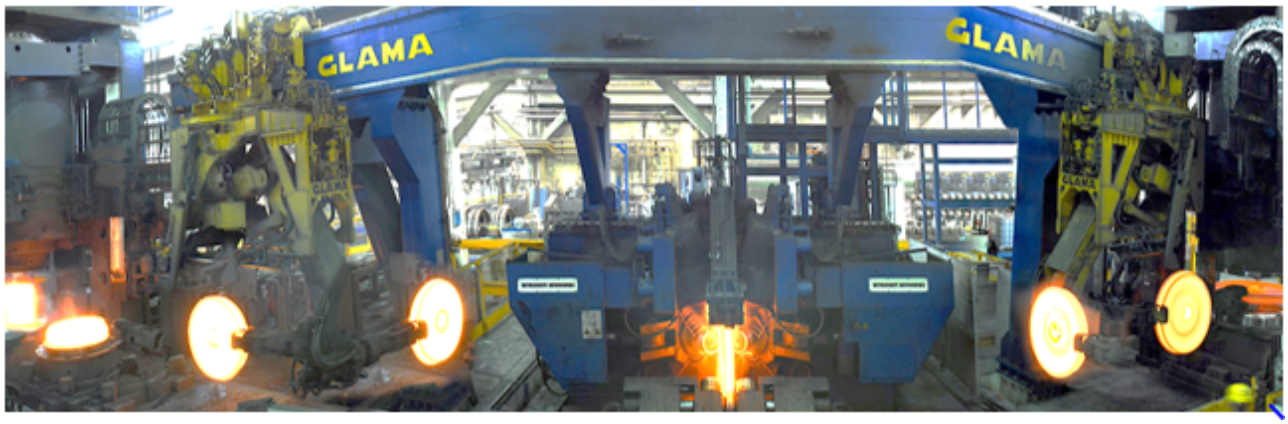


FIGURE 21 – Laminoir utilisé pour la mise en forme d'une roue ferroviaire [139].

La phase de traitement thermique débute via passage en four d'austénitisation. La pièce laminée est chauffée à une température avoisinant les 880° puis subit une trempe par jets d'eau d'une durée comprise entre 100 et 400s selon la géométrie. Un revenu est ensuite réalisé à 500° pendant une durée de 2h permettant de supprimer les contraintes résiduelles induites par la trempe. Ce traitement thermique permet d'obtenir une structure ferrito-perlitique dans la jante et le moyeu (figure 22).

FIGURE 22 – Trempe d'une roue en sortie d'un four d'austénitisation [139].

La troisième phase de fabrication s'effectue via alternance entre usinage de la roue et contrôle dimensionnel. Les étapes de fabrication de la roue sont résumées sur la figure 23.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

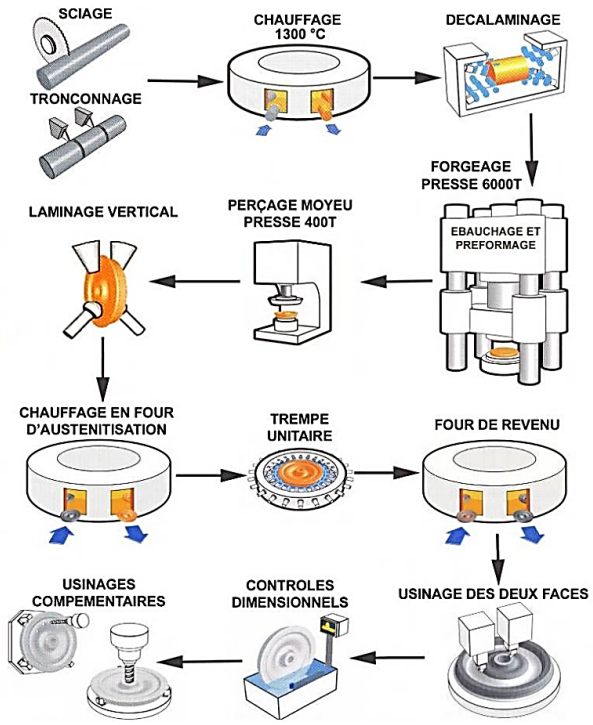


FIGURE 23 – Étapes de fabrication d'une roue [140].

B Processus de fabrication des rails

Les rails sont fabriqués à partir de blooms produits en fonderie. Ces blooms peuvent mesurer jusqu'à 8.6m de long, et peser environ 7t . Chaque bloom de 8.6m donnera un rail de 108m de long pouvant être recoupé.

FIGURE 24 – Stockage de Bloom en attente de laminage.

La première étape de fabrication consiste à enfourner les blooms et à les chauffer pendant 3 à 4h

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

afin de leurs faire atteindre une température en sortie de l'ordre 1200°C. Le bloom est austénitisé avant la prochaine étape de fabrication, voir aussi figure 25.

FIGURE 25 – Aperçu d'un bloom en sortie de four avant laminage.

Les blooms sont laminés dans des cages dégrossisseuses, le rail dégrossi a vu sa section divisée par 10 et sa longueur multipliée par 10. Un laminage de finition est ensuite réalisé.

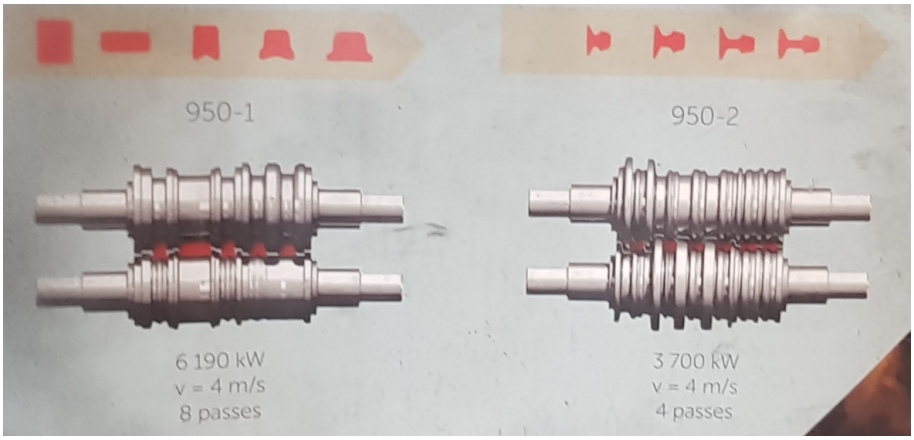


FIGURE 26 – Cages dégrossisseuses utilisées pour le laminage d'un bloom mentionnant les profils obtenus après chaque laminage.

Une passe de finition donne une forme définitive au rail. Elle s'effectue à « basse » température (environ 900°C). La diminution de la température limite la présence de contraintes résiduelles dans le produit fini. Le rail est ensuite décalaminé via un arrosage par jets d'eau à haute pression. Le décalaminage consiste à retirer la couche d'oxydes formée lors du laminage. L'objectif étant de permettre la réalisation du contact électrique entre le rail et les roues des véhicules. Il améliore aussi l'état de surface du produit fini. Pour la nuance R260, un refroidissement à l'air est ensuite réalisé pendant une durée de 4h afin de préparer les pièces fabriquées pour une étape de dressage à froid. Ce dernier permet d'homogénéiser les contraintes résiduelles liées à la plastification du rail afin d'améliorer certaines de ses propriétés mécaniques (ténacité, résistance à la compression).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

La fabrication des rails est alors terminée. Toutes les pièces produites sont examinées en surface et dans leurs volumes via la réalisation de contrôles non destructifs (ultrasons, courant de Foucault). Les contrôles sont systématiques et permettent de garantir la santé interne des pièces fabriquées. In fine, environ 1% des rails présentent des défauts métallurgiques imposant leurs rebuts (ils retournent à l'aciérie pour être fondus).

Plusieurs points communs existent entre rails et roues (similitude composition chimique et propriétés mécaniques). Ces deux éléments étudiés distinctivement sont a priori bien compris. Néanmoins, leurs interactions fait encore l'objet de nombreuses études, et ce, en allant des échelles microscopiques à macroscopiques.

C Facteurs de frottement pour un taux de glissement constant et différentes hygrométries relatives

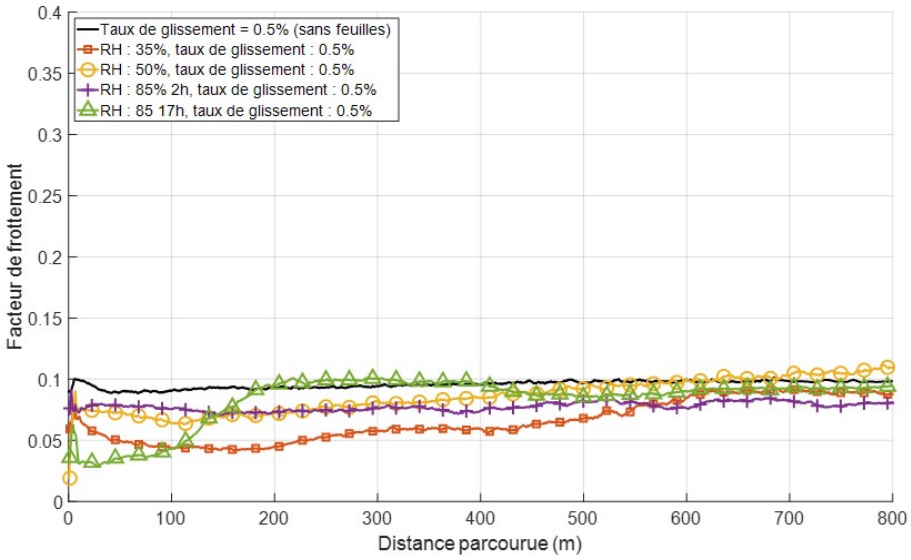


FIGURE 27 – Facteurs de frottement obtenus pour un taux de glissement de 0.5%.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

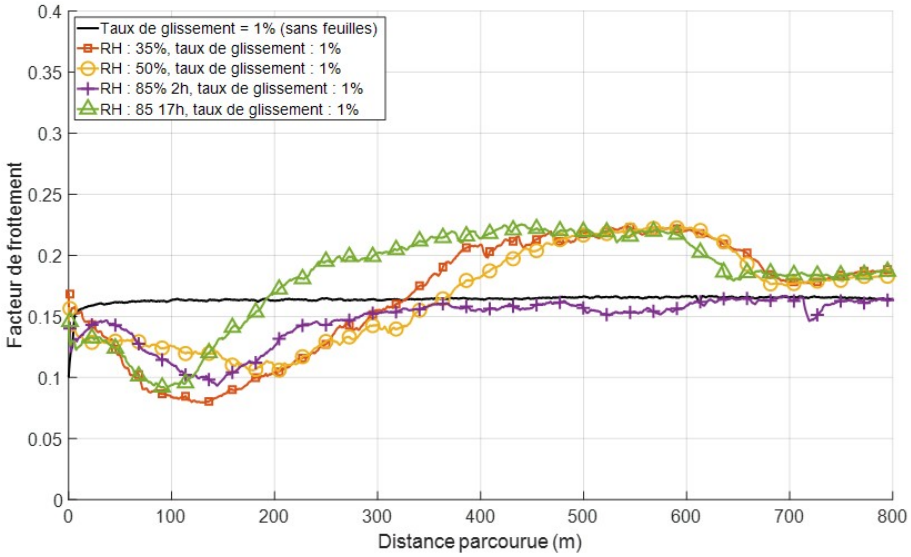


FIGURE 28 – Facteurs de frottement obtenus pour un taux de glissement de 1%.

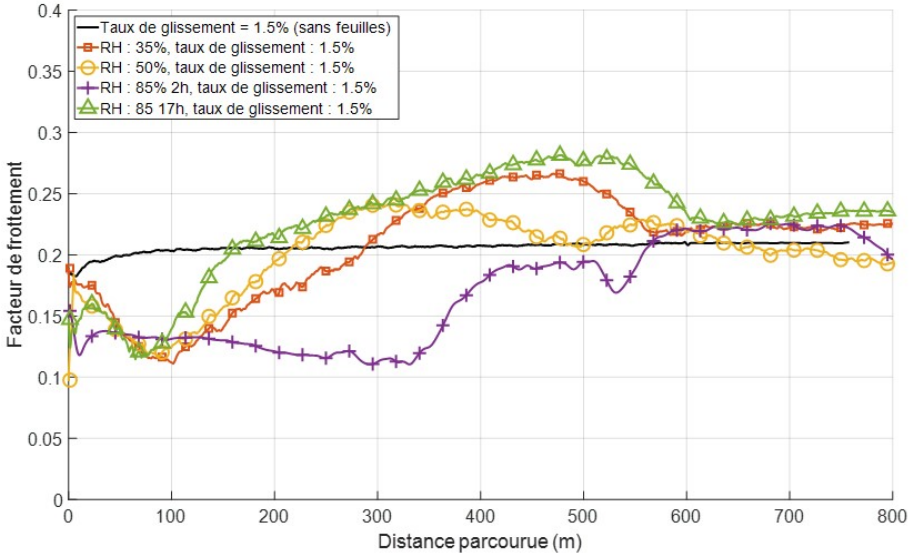


FIGURE 29 – Facteurs de frottement obtenus pour un taux de glissement de 1.5%.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

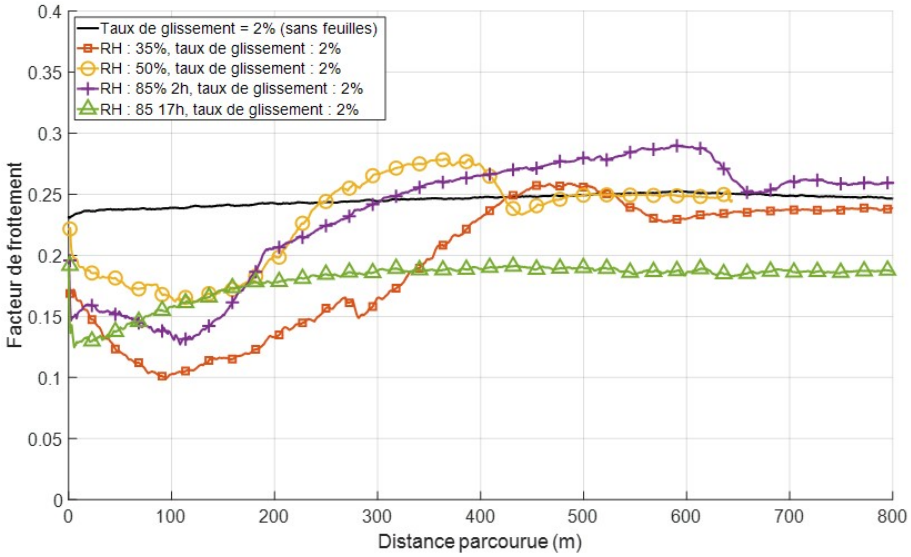


FIGURE 30 – Facteurs de frottement obtenus pour un taux de glissement de 2%.

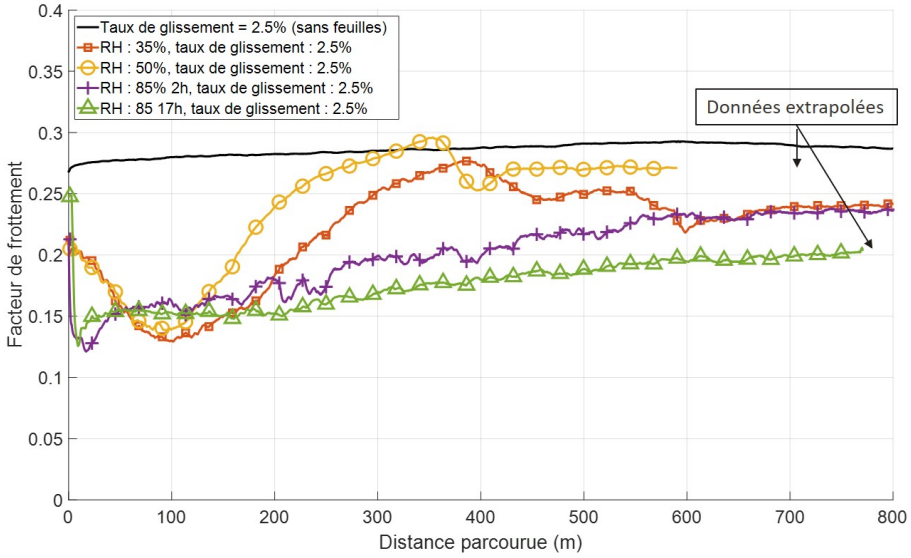


FIGURE 31 – Facteurs de frottement obtenus pour un taux de glissement de 2.5%.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

D Facteurs de frottement pour une hygrométrie relative constante et différents taux de glissement

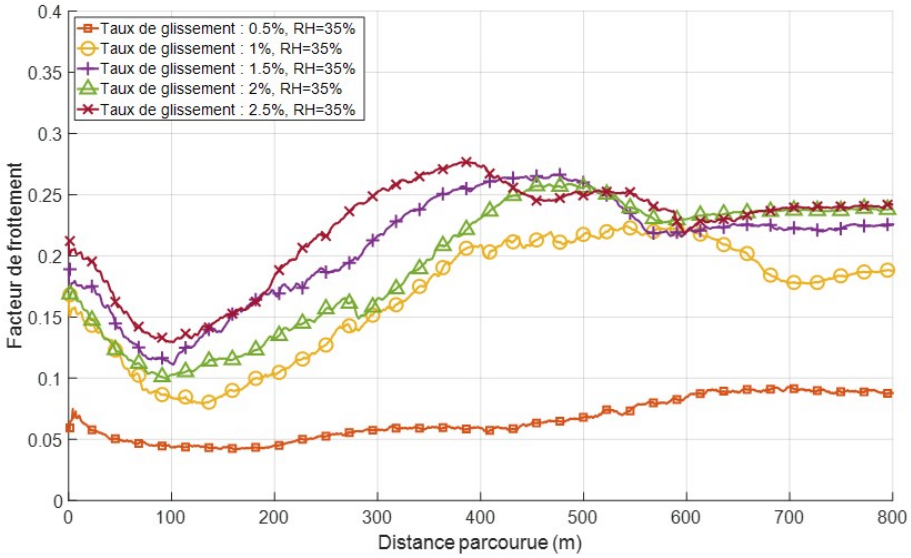


FIGURE 32 – Facteurs de frottement obtenus pour une hygrométrie relative de 35%.

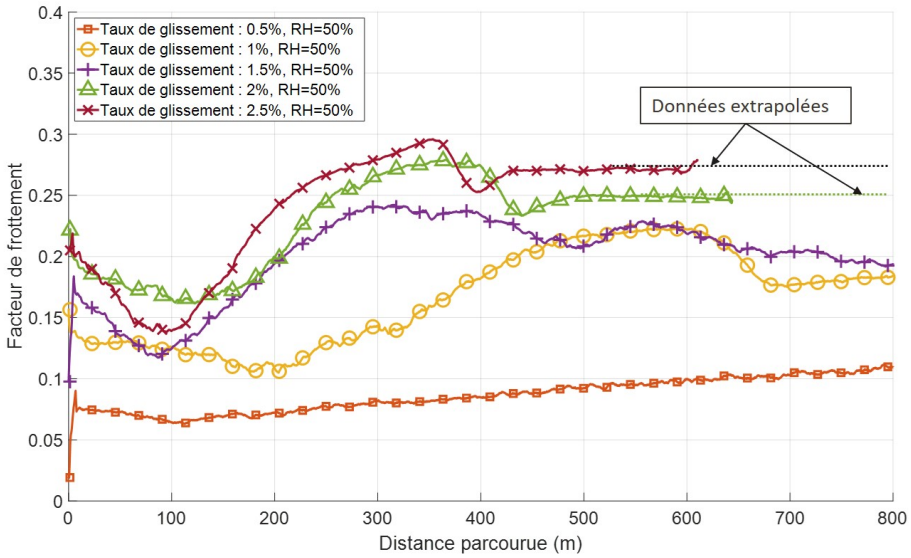


FIGURE 33 – Facteurs de frottement obtenus pour une hygrométrie relative de 50%.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

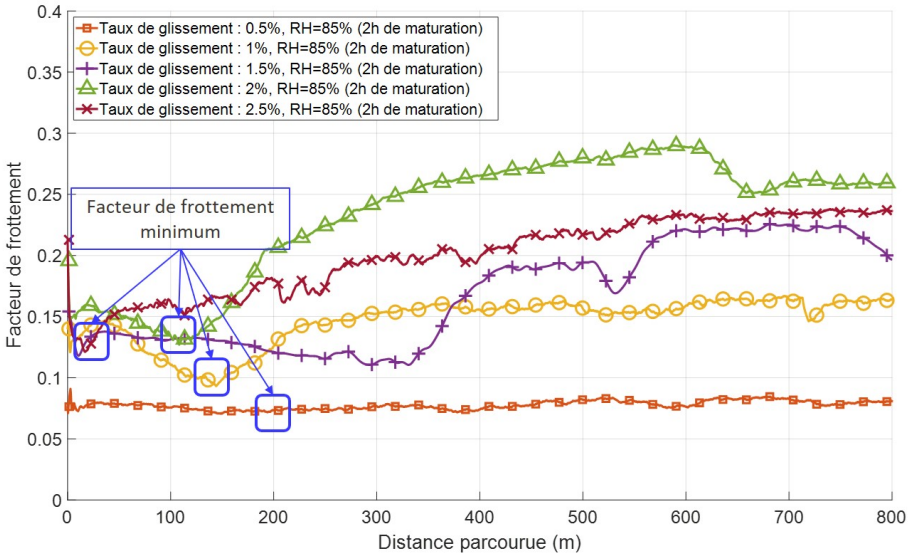


FIGURE 34 – Facteurs de frottement obtenus pour une hygrométrie relative de 85% (2h de maturation).

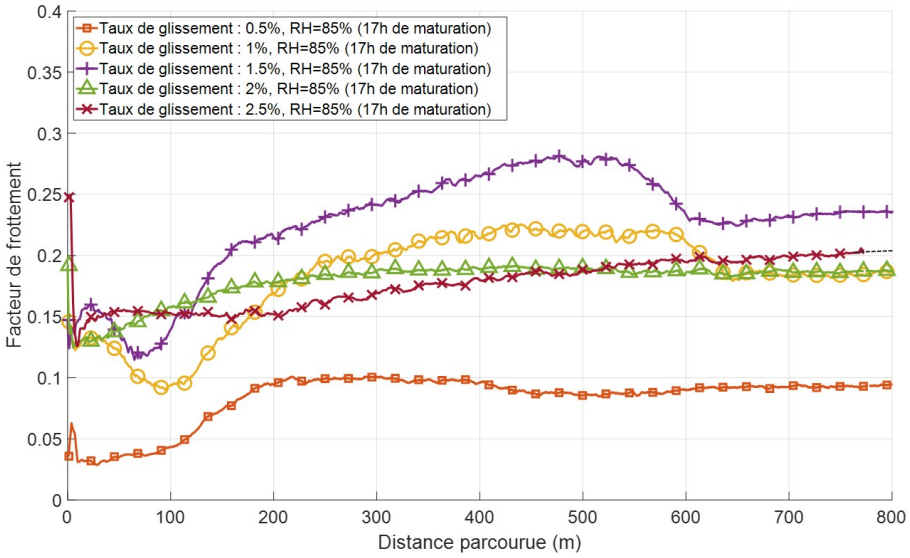


FIGURE 35 – Facteurs de frottement obtenus pour une hygrométrie relative de 85% (17h de maturation).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

E Facteurs de frottement cycliques dont les variations sont "non classiques"

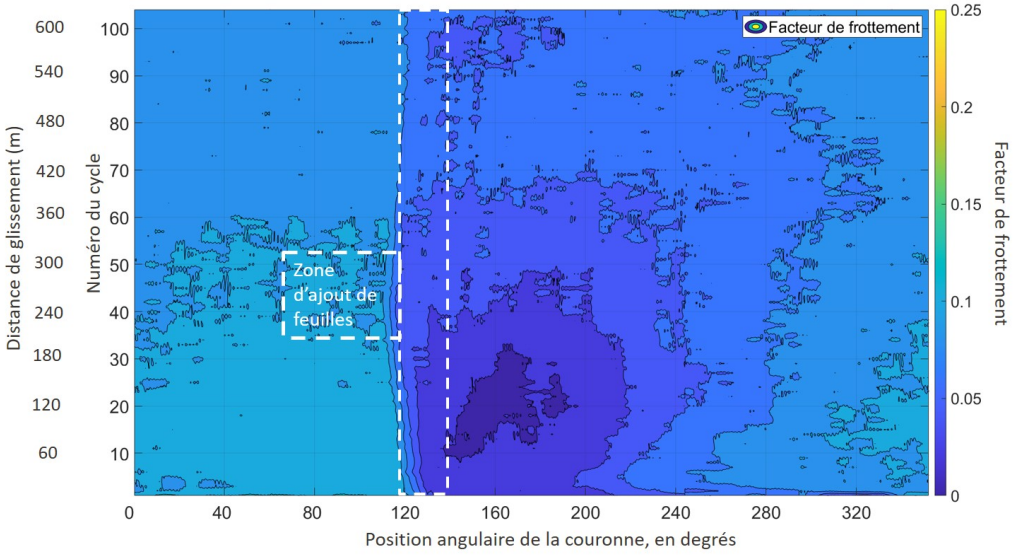


FIGURE 36 – Facteurs de frottement cycliques. Taux de glissement : 0.5%, hygrométrie relative : 85% (2h de maturation).

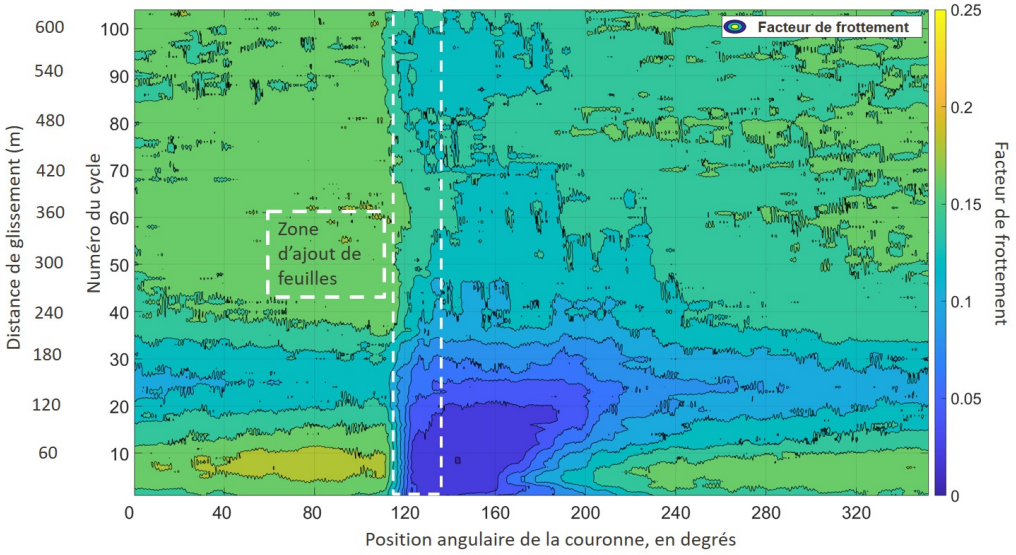


FIGURE 37 – Facteurs de frottement cycliques. Taux de glissement : 1%, hygrométrie relative : 85% (2h de maturation).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

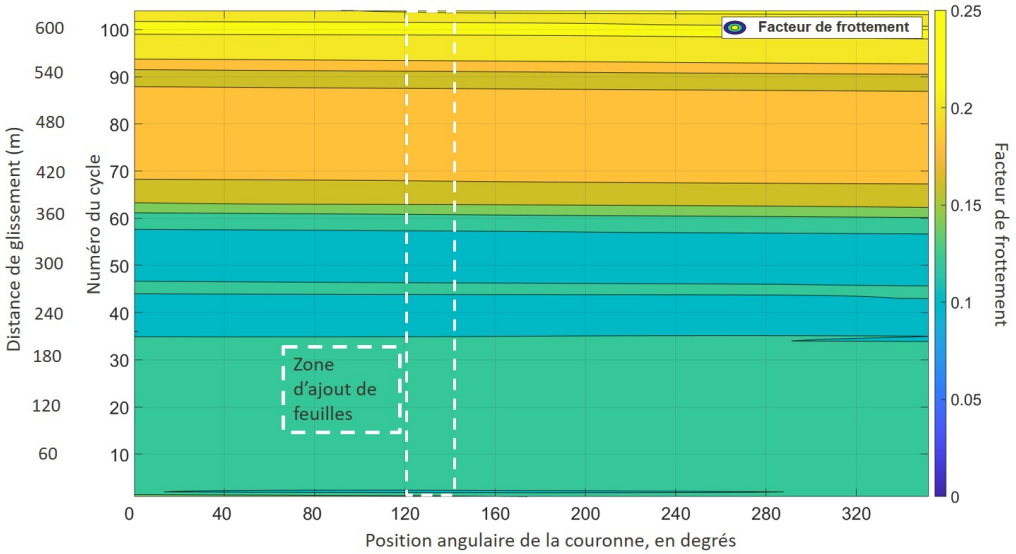


FIGURE 38 – Facteurs de frottement cycliques. Taux de glissement : 1.5%, hygrométrie relative : 85% (2h de maturation).

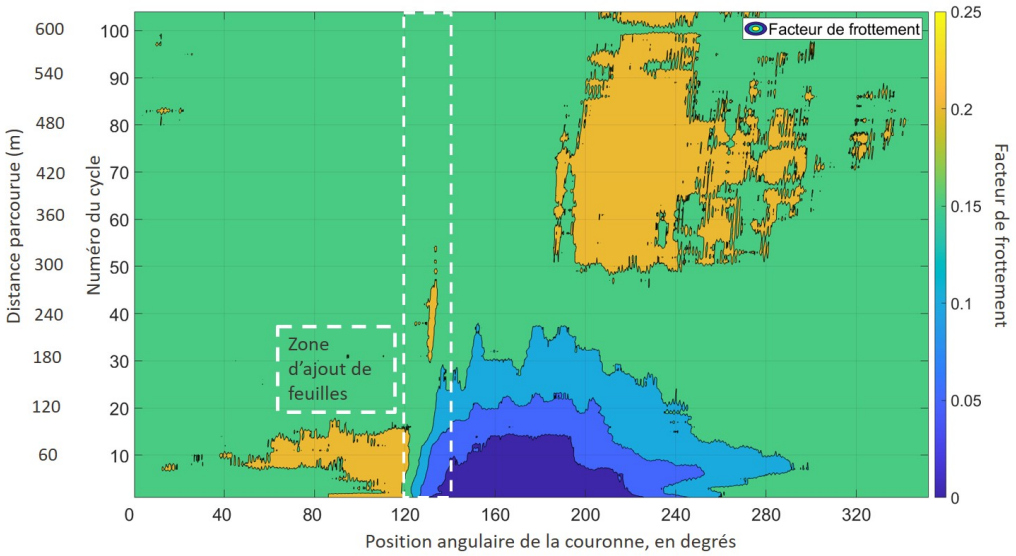


FIGURE 39 – Facteurs de frottement cycliques. Taux de glissement : 2%, hygrométrie relative : 85% (17h de maturation).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

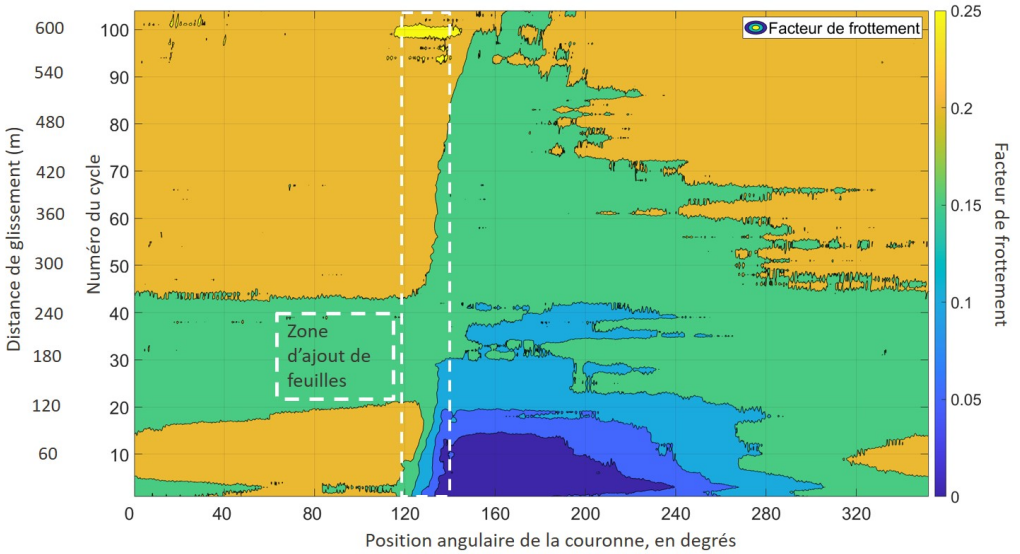


FIGURE 40 – Facteurs de frottement cycliques. Taux de glissement : 2.5%, hygrométrie relative : 85% (2h de maturation).

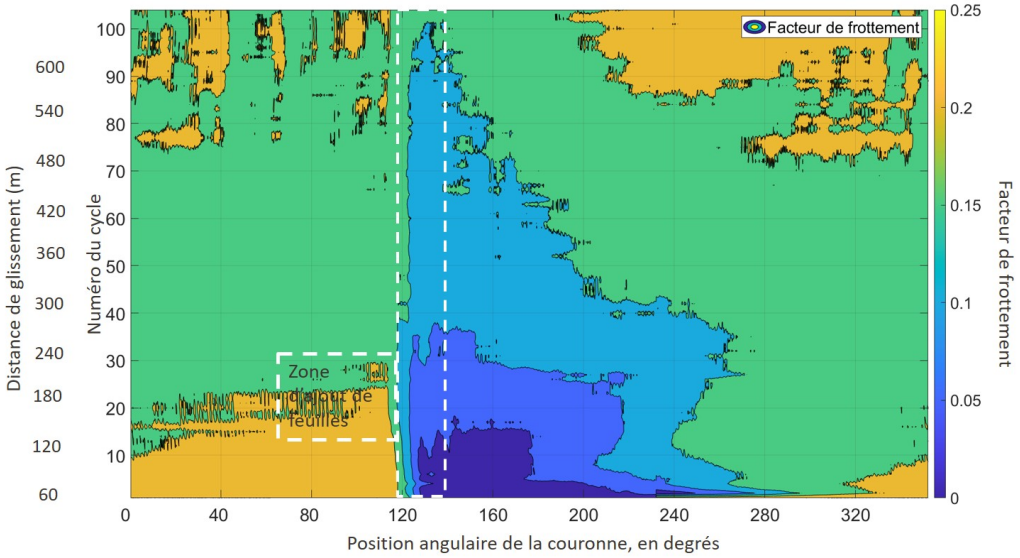


FIGURE 41 – Facteurs de frottement cycliques. Taux de glissement : 2.5%, hygrométrie relative : 85% (17h de maturation).

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

F Données énergétiques liées aux seuils n°1 et n°4

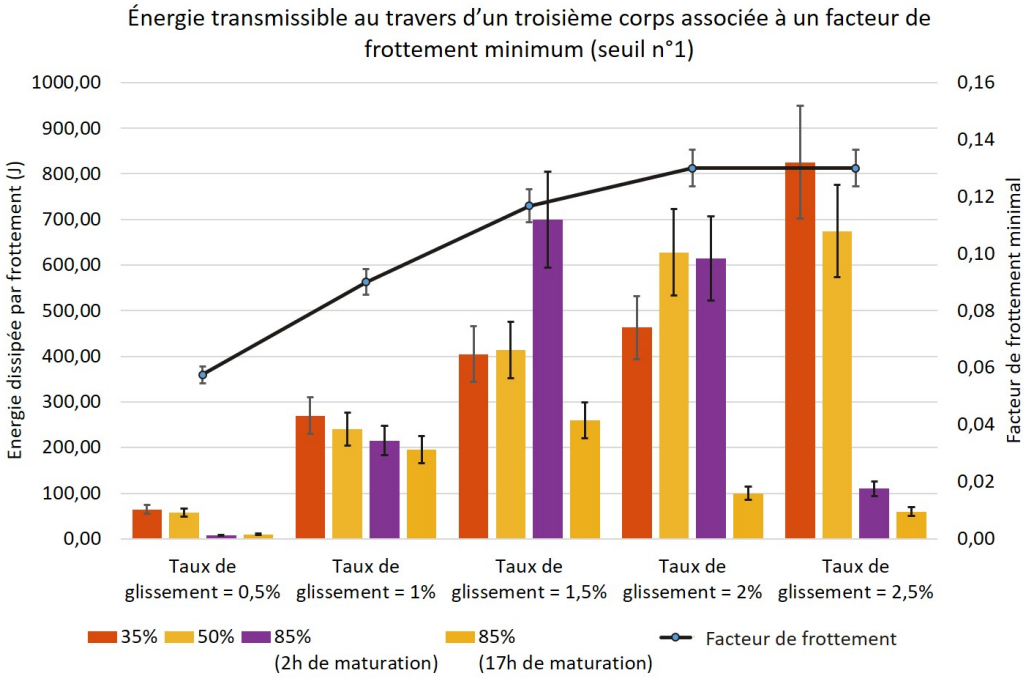


FIGURE 42 – Énergie transmissible au travers d'un troisième corps associée au seuil n°1.

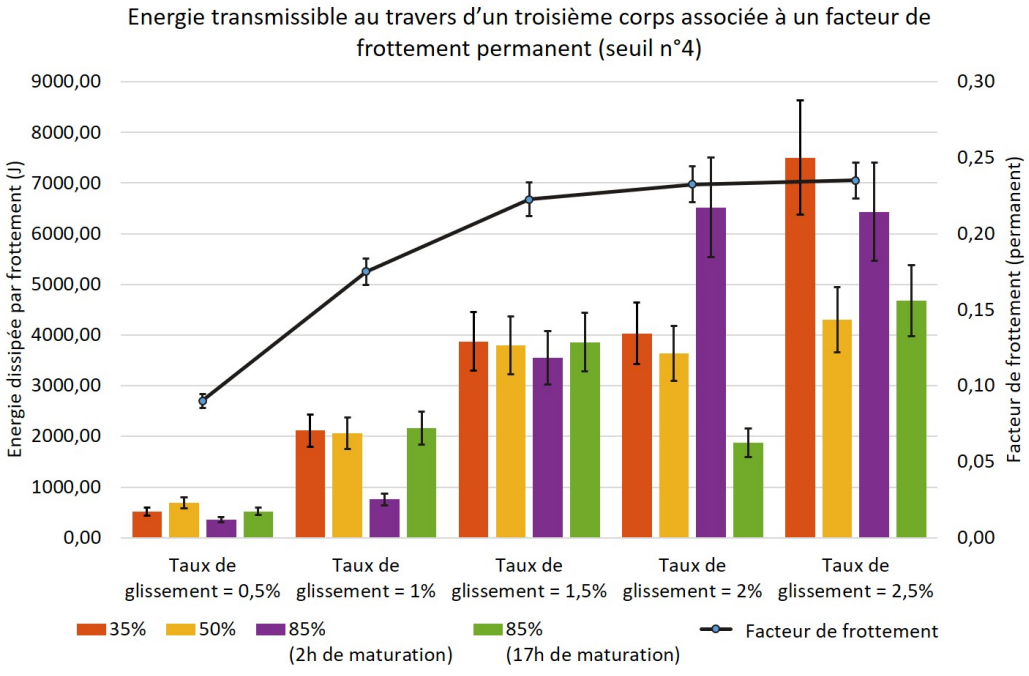


FIGURE 43 – Énergie transmissible au travers d'un troisième corps associée au seuil n°4.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

Bibliographie

[1] R. Lewis and U. Olofsson. Basic tribology of the wheel–rail contact. In *Wheel–Rail Interface Handbook*, pages 34–57. Elsevier, 2009.

[2] BEA-TT. Rapport d'enquête technique sur la dérive du TER n° 871479 survenue le 18 décembre 2013 à Mérens-les-Vals (09). Technical Report 09, Paris, France, 2015.

[3] SNCF Réseau. Adhérence, les solutions de SNCF, 2021.

[4] J. J. Kalker. Survey of Wheel—Rail Rolling Contact Theory. *Vehicle System Dynamics*, 8(4) :317–358, sep 1979.

[5] J.-C. Alacoque and P. Chapas. Transport ferroviaire : gestion de l'adhérence. *Techniques de l'ingénieur*, page 42, 2005.

[6] RSSB. Managing Low Adhesion. *Adhesion Working Group Manual*, (6) :1–351, 2018.

[7] E. Niccolini. *Adhérence roue rail en traction, réalité tribologique en condition de démarrage.* PhD thesis, INSA Lyon, 2001.

[8] K. Ishizaka. *The Low Adhesion Problem due to Leaf Contamination in the Wheel / Rail Contact : Bonding and Low Adhesion Mechanisms.* PhD thesis, The university of Sheffield, 2019.

[9] M. Godet. The third-body approach : A mechanical view of wear. *Wear*, 100(1-3) :437–452, dec 1984.

[10] CITEPA. Rapport Secten 2021. 2021.

[11] SNCF Reseau. Les atouts du ferroviaire, 2021.

[12] AFNOR. Norme européenne NF EN 15313 Application ferroviaires, exploitation des essieux en service, maintenance des essieux en exploitation ou déposé, 2010.

[13] AFNOR. NF EN 13262+A2, applications ferroviaires, essieux montés et bogies, roues - prescription pour le produit, 2011.

[14] R. Hamam. Simulation de la propagation des fissures par fatigue dans les toiles des roues de train sous chargement à amplitude variable. page 244, 2006.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

[15] P. Merino, S. Cazottes, V. Lafilé, M. Risbet, A. Saulot, S. Bouvier, J. Marteau, and Y. Berthier. How to reproduce a mechanical white etching layer (WEL) on rail surface thanks to a new experimental wheel-rail contact test bench. *Wear*, 482-483(May), 2021.

[16] SNCF AEF. Mesure de dureté d'une roue en Acier ER7, 1990.

[17] SNCF AEF. Archive AEF Fibrage roue.

[18] D. Glenard. Parties d'une voie de chemin de fer, 2006.

[19] P. Chapas. Roulement ferroviaire Aspect mécanique de traction. 33(0), 2013.

[20] P. Pointer, A. Joerg, and J. Jaiswal. Definitive guidelines on the use of different rail grades. *Innotract IP6*, page 45, 2009.

[21] AFNOR. EN 13674-1 Rails vignoles de masse supérieure ou égale à 46kg, 2011.

[22] J. Jaiswal. Innovation to enhance rail performance, Corus Rails, 2010.

[23] B. Dylewski. *Caractérisation expérimentale multi-échelles et multi-techniques du rail prélevé en service - De la déformation plastique sévère et des évolutions de microstructure à l'amorçage de fissures par Fatigue de Contact de Roulement*. PhD thesis, 2016.

[24] K. A. Meyer, D. Nikas, and J. Ahlström. Microstructure and mechanical properties of the running band in a pearlitic rail steel : Comparison between biaxially deformed steel and field samples. *Wear*, 396-397(November 2017) :12–21, 2018.

[25] X. Quost. *Modélisation de l'effet du vent sur les trains à grande vitesse – Etude dynamique et stochastique appliquée aux risques de renversement*. PhD thesis, EC Lyon, 2005.

[26] S. Simon. De la dynamique ferroviaire à l'accommodation microstructurale du rail. 2014.

[27] H. Hertz. Uber die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für reine und angewandte Mathematik*, 92, 1882.

[28] K. L. Johnson. *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, may 1985.

[29] P. Merino. *Reproduction experimentale du contact roue-rail à échelle réduite*. PhD thesis, INSA Lyon, 2019.

[30] F. W. Carter. Action of a Locomotive Driving Wheel . *Proc. R. Soc. Lond. A*, 112(760) :151–157, 1926.

[31] C. Coulomb. *Théorie des machines simples*. Académie Royale des Sciences, Paris, 1785.

[32] D. J. Haines and E. Ollerton. Contact Stress Distributions on Elliptical Contact Surfaces Subjected to Radial and Tangential Forces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 177(1) :95–114, 1963.

[33] K. L. Johnson. The effect of a tangential contact force upon the rolling motion of an elastic sphere on a plane. *Journal of Applied Mechanics*, 80(9) :339–346, 1958.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

[34] D. J. Haines and E. Ollerton. Contact Stress Distributions on Elliptical Contact Surfaces Subjected to Radial and Tangential Forces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 177(1) :95–114, jun 1963.

[35] K. L. Johnson and P. J. Vermeulen. Contact of non-spherical bodies transmitting tangential forces. *J. of Appl. Mech*, 31(2) :339–340, 1964.

[36] A. Saulot. Analyse tribologique du contact roue-rail : modélisation et expérimentations. pages 53–110, 2006.

[37] Y. Berthier. *Mécanismes et tribologie*. PhD thesis, 1988.

[38] S. Descartes, C. Desrayaud, E. Niccolini, and Y. Berthier. Presence and role of the third body in a wheel-rail contact. *Wear*, 258(7-8) :1081–1090, 2005.

[39] G. Colas. Utilisation raisonnée de contaminants pour caractériser la rhéologie des 1ers et 3ème corps solides : Application à la tribologie en ambiances spatiales. 2013.

[40] J. Denape. Concept de troisième corps et comportement des particules d'usure en frottement sec, 2018.

[41] Y. Berthier, S. Descartes, M. Busquet, E. Niccolini, C. Desrayaud, L. Baillet, and M. C. Baietto-Dubourg. The role and effects of the third body in the wheel-rail interaction. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 27(5) :423–426, 2004.

[42] R. Charlery. Comportements sous sollicitations tribologiques d ' un matériau énergétique : Recherche des conditions de contrôle de la sécurité de fabrication. 2016.

[43] H. X. Joe. Analyse de la transmission des sollicitations tribologiques dans un presse-garnitures de robinet pour en maîtriser l ' effort de manœuvre et l ' étanchéité. 2013.

[44] A. Saulot. *Analyse tribologique du contact roue-rail Modélisation et expérimentations – Cas de l ' usure ondulatoire*. PhD thesis, INSA-Lyon, 2015.

[45] H. Richard, M. Fulland, and G. Sander. Fracture in a rubber-sprung railway wheel. *Engineering Failure Analysis*, pages 986–999, 2005.

[46] Department for Transport News. RAIB Statement : Salisbury rail accident, 2021.

[47] C. européenne. Règlement (UE) n ° 1302/2014 de la Commission du 18 novembre 2014 concernant une spécification technique d'interopérabilité relative au sous-système «matériel roulant» — «Locomotives et matériel roulant destiné au transport de passagers» du système ferrov, 2020.

[48] D. Tabor. Surface forces and surface interactions. *Journal of Colloid And Interface Science*, 58(1) :2–13, 1977.

[49] R. J. Good. On the definition of adhesion. *The Journal of Adhesion*, 8(1) :1–9, 1976.

[50] O. Polach. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. *Wear*, 258(7-8) :992–1000, 2005.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

[51] M. Boiteux. Adhérence en freinage et anti-enrayeurs : Synthèse des connaissances actuelles sur l'adhérence. *ERRI*, (Rapport No. B164/RP1.) :58, 1985.

[52] C. Murray. Wheelslip and APT. *Proceedings of Institution of Mechanic Engineers*, 3(2) :22–27, 1978.

[53] S. R. Lewis, R. Lewis, U. Olofsson, D. T. Eadie, J. Cotter, and X. Lu. Effect of humidity, temperature and railhead contamination on the performance of friction modifiers : Pin-on-disk study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 227(2) :115–127, mar 2013.

[54] O. Bringel. *Etude des caractéristiques chimiques et structurales, d'une pollution solide, formée sur les rails de voies ferrées et les roues de matériels roulants et ayant un caractère isolant (d'un point de vue électrique).* PhD thesis, 2021.

[55] K. Ishizaka, B. White, M. Watson, S. R. Lewis, and R. Lewis. Influence of temperature on adhesion coefficient and bonding strength of leaf films : A twin disc study. *Wear*, 454-455(August 2019) :203330, 2020.

[56] K. Ishizaka, S. R. Lewis, and R. Lewis. The low adhesion problem due to leaf contamination in the wheel/rail contact : Bonding and low adhesion mechanisms. *Wear*, 378-379 :183–197, 2017.

[57] AWG and RSSB. Adhesion Manual Edition 6.0. (January) :1–351, 2018.

[58] H. Verbeeck. Present knowledge of adhesion and its utilisation. *Rail International*, 6, 1973.

[59] M. A. Spiroiu. About the influence of wheel-rail adhesion on the maximum speed of trains. *MATEC Web of Conferences*, 178 :1–6, 2018.

[60] A. Meierhofer, G. Trummer, C. Bernsteiner, and K. Six. How the weather in autumn influenced the wheel-rail traction characteristic during vehicle tests. *Proceedings of the 11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/wheel Systems, CM 2018*, pages 727–733, 2018.

[61] N. Jan and H. Boje. *Management of low adhesion on railway tracks in European countries.* 2014.

[62] K. jie Rong, Y. long Xiao, M. xue Shen, H. ping Zhao, W. J. Wang, and G. yao Xiong. Influence of ambient humidity on the adhesion and damage behavior of wheel–rail interface under hot weather condition. *Wear*, 486-487(August) :204091, 2021.

[63] K. Nagase. A study of adhesion between the rails and running wheels on main lines : Results of investigations by slipping adhesion test bogie. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 203(1) :33–43, 1989.

[64] T. Oyama. High speed and high adhesion (in Japanese). *RRR*, pages 9–14, 1994.

[65] T. M. Beagley. Rheological properties of solid rail contaminants and their effect on wheel-rail adhesion. *Engng. Symp.*, 1(1 , Jan.-Feb. 1977) :12–18, 1977.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

[66] B. White. Using Tribo-Chemistry Analysis to Understand Low Adhesion in the Wheel-Rail Contact. *PhD thesis, The University of Sheffield*, (April), 2018.

[67] M. Omasta, M. Machatka, D. Smejkal, M. Hartl, and I. Křupka. Influence of sanding parameters on adhesion recovery in contaminated wheel–rail contact. *Wear*, 322-323 :218–225, jan 2015.

[68] O. Arias-Cuevas, Z. Li, and R. Lewis. A laboratory investigation on the influence of the particle size and slip during sanding on the adhesion and wear in the wheel–rail contact. *Wear*, 271(1-2) :14–24, may 2011.

[69] R. Lewis and R. S. Dwyer-Joyce. Wear at the wheel/rail interface when sanding is used to increase adhesion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 220(1) :29–41, 2006.

[70] R. Lewis, R. S. Dwyer-Joyce, and J. Lewis. Disc machine study of contact isolation during railway track sanding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 217(1) :11–24, 2003.

[71] W. J. Wang, H. F. Zhang, H. Y. Wang, Q. Y. Liu, and M. H. Zhu. Study on the adhesion behavior of wheel/rail under oil, water and sanding conditions. *Wear*, 271(9) :2693–2698, 2011.

[72] R. Lewis, E. A. Gallardo-Hernandez, T. Hilton, and T. Armitage. Effect of oil and water mixtures on adhesion in the wheel/rail contact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 223(3) :275–283, may 2009.

[73] W. Skipper, A. Chalisey, and R. Lewis. A review of railway sanding system research : Wheel/rail isolation, damage, and particle application. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 234(6) :567–583, jul 2020.

[74] L. B. Shi, L. Ma, J. Guo, Q. Y. Liu, Z. R. Zhou, and W. J. Wang. Influence of low temperature environment on the adhesion characteristics of wheel-rail contact. *Tribology International*, 127 :59–68, 2018.

[75] H. Krause and G. Poll. The influence of the real material and system properties on the traction-creep relationships in rolling contact. *Wear*, 86(2) :267–285, apr 1983.

[76] G. Donzella, M. Faccoli, A. Mazzù, C. Petrogalli, and R. Roberti. Progressive damage assessment in the near-surface layer of railway wheel-rail couple under cyclic contact. *Wear*, 271(1-2) :408–416, 2011.

[77] E. Steudle. Transport of Water in Plants. *Environment Control in Biology*, 40(1) :29–37, 2002.

[78] E. Konomics. Description of a plant stomata, 2012.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

[79] J.-L. Wertz. La lignine. *ValBiom, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège*, page 23, 2010.

[80] G. Bokiau. Leaf diagram.

[81] A. Dufour, M. Castro-Diaz, N. Brosse, M. Bouroukba, and C. Snape. The Origin of Molecular Mobility During Biomass Pyrolysis as Revealed by In situ 1 H NMR Spectroscopy. *ChemSusChem*, 5(7) :1258–1265, jul 2012.

[82] M. McNeil, A. G. Darvill, S. C. Fry, and P. Albersheim. Structure and function of the primary cell walls of plants. *Annual Review of Biochemistry*, 53(1) :625–663, jun 1984.

[83] D. M. Updegraff. Semimicro determination of cellulose inbiological materials. *Analytical Biochemistry*, 32(3) :420–424, dec 1969.

[84] R.-C. Sun. *Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels*. Elsevier, 2010.

[85] M. J. Lundahl, A. G. Cunha, E. Rojo, A. C. Papageorgiou, L. Rautkari, J. C. Arboleda, and O. J. Rojas. Strength and Water Interactions of Cellulose I Filaments Wet-Spun from Cellulose Nanofibril Hydrogels. *Scientific Reports*, 6(1) :30695, nov 2016.

[86] K. Mazeau and L. Heux. Molecular dynamics simulations of bulk native crystalline and amorphous structures of cellulose. *Journal of Physical Chemistry B*, 107(10) :2394–2403, 2003.

[87] H. Heldt. *Plant Biochemistry*. Elsevier, 2011.

[88] I. Laghi. Détail de l'agencement des molécules et de leurs liaisons hydrogène dans la cellulose en microfibrille., 2016.

[89] P. M. Collins. *Dictionary of Carbohydrates*. Chapman and Hall/CRC, 2 edition, 2006.

[90] S. Tatjana. *Chimie du bois / Tatjana Stevanovic, Dominique Perrin*. Collection Chimie. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2009.

[91] P. Albersheim. Instability of pectin in neutral solutions. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 1 :253–256, 1959.

[92] H. Chen, T. Furuya, S. Fukagai, S. Saga, J. Ikoma, K. Kimura, and J. Suzumura. Wheel slip/Slide and low adhesion caused by fallen leaves. *Wear*, 446-447(January) :203187, 2020.

[93] P. M. Cann. The "leaves on the line" problem—a study of leaf residue film formation and lubricity under laboratory test conditions. *Tribology Letters*, 24(2) :151–158, 2006.

[94] S. R. Lewis, R. Lewis, J. Cotter, X. Lu, and D. T. Eadie. A new method for the assessment of traction enhancers and the generation of organic layers in a twin-disc machine. *Wear*, 366-367 :258–267, 2016.

[95] Y. Zhu, Y. Lyu, and U. Olofsson. Mapping the friction between railway wheels and rails focusing on environmental conditions. *Wear*, 324-325 :122–128, 2015.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

[96] Z. Li, O. Arias-Cuevas, R. Lewis, and E. A. Gallardo-Hernández. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in leaf contaminated wheel-rail contacts. *Tribology Letters*, 33(2) :97–109, 2009.

[97] U. Olofsson and K. Sundvall. Influence of leaf, humidity and applied lubrication on friction in the wheel-rail contact : Pin-on-disc experiments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 218(3) :235–242, 2004.

[98] E. Gallardo-Hernandez and R. Lewis. Twin disc assessment of wheel/rail adhesion. *Wear*, 265(9-10) :1309–1316, oct 2008.

[99] G. Vasic, F. J. Francis, A. Kapoor, and V. Lucanin. Laboratory simulation of low-adhesion leaf film on rail steel. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2(1-2) :84–97, 2008.

[100] O. Arias-Cuevas and Z. Li. Field investigations into the adhesion recovery in leaf-contaminated wheel-rail contacts with locomotive sanders. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(5) :443–456, 2011.

[101] Y. Zhu, U. Olofsson, and R. Nilsson. A field test study of leaf contamination on railhead surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(1) :71–84, jan 2014.

[102] D. Tamura, A. Numakura, and M. Takigawawa. An effective measure for prevention against slippingsliding problems of the wheel due to leaf contamination on the railways. *Proceedings of Japan Society of Civil Engineers*, pages 4–226, 2007.

[103] U. Olofsson and K. Sundvall. Influence of leaf, humidity and applied lubrication on friction in the wheel-rail contact : Pin-on-disc experiments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 218(3) :235–242, may 2004.

[104] U. Olofsson. A multi-layer model of low adhesion between railway wheel and rail. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 221(3) :385–389, may 2007.

[105] K. Ishizaka, S. R. Lewis, D. Hammond, and R. Lewis. Chemistry of black leaf films synthesised using rail steels and their influence on the low friction mechanism. *RSC Advances*, 8(57) :32506–32521, 2018.

[106] C. R. Fulford. Review of Low Adhesion Research. *RSSB report CRF04002*, 2004.

[107] V. Linck. *Modélisation numérique temporelle d'un contact frottant : mise en évidence d'instabilités locales de contact : conséquences tribologiques*. PhD thesis, 2005.

[108] S. Watkins. A Twelve Month Study on a 280 km Route. Technical report, BR Research, London, 1976.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

[109] D. T. Eadie, H. Harrison, R. Kempka, R. Lewis, A. Keylin, and N. Wilson. Field assessment of friction and creepage with a new tribometer. *Proceedings of the 11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/wheel Systems, CM 2018*, pages 208–217, 2018.

[110] C. T. Foo, B. Omar, and A. S. Jalil. A review on recent wheel/rail interface friction management. *Journal of Physics : Conference Series*, 1049(1), 2018.

[111] Y. Zhu. *Adhesion in the wheel-rail contact under contaminated conditions.* Stockholm, 2011.

[112] P. Clayton. Tribological aspects of wheel-rail contact : A review of recent experimental research. *Wear*, 191(1-2) :170–183, 1996.

[113] H. Chen, S. Fukagai, K. Murakami, T. Furuya, S. Saga, and T. Ban. Influence of leaves on the adhesion between wheel and rail. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute)*, 59(1) :65–71, 2018.

[114] Climate-data.org. Données météorologiques moyenne sur la région Nord-Pas-de-Calais, 2020.

[115] B. White, R. Nilsson, U. Olofsson, A. Arnall, M. Evans, T. Armitage, J. Fisk, D. Fletcher, and R. Lewis. Effect of the presence of moisture at the wheel–rail interface during dew and damp conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 232(4) :979–989, apr 2018.

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

[117] B. White and R. Lewis. Simulation and understanding the wet-rail phenomenon using twin disc testing. *Tribology International*, 136(March) :475–486, 2019.

[118] L. Thiercelin, L. Saint-Aimé, F. Lebon, and A. Saulot. Thermomechanical modelling of the tribological surface transformations in the railroad network (white etching layer). *Mechanics of Materials*, 151 :103636, dec 2020.

[119] British Steel. Rail Steel Grades - Steel Compositions and Properties, 2017.

[120] FEI. User ' s Operation Manual Quanta FEI 600. Technical report, 2003.

[121] G. Socrates. Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies : Tables and Charts. 3rd ed By George Socrates (The University of West London, Middlesex, U.K.). J. Wiley and Sons : Chichester. 2001. xviii + 348 pp. $185.00. ISBN : 0-471-85298-8. *Journal of the American Chemical Society*, 124(8) :1830–1830, feb 2002.

[122] S. Cichosz and A. Masek. IR study on cellulose with the varied moisture contents : Insight into the supramolecular structure. *Materials*, 13(20) :1–22, 2020.

[123] E. Kontturi and T. Vuorinen. Indirect evidence of supramolecular changes within cellulose microfibrils of chemical pulp fibers upon drying. *Cellulose*, 16(1) :65–74, 2009.

[124] H. Chen, T. Furuya, S. Fukagai, S. Saga, J. Ikoma, K. Kimura, and J. Suzumura. Wheel slip/Slide and low adhesion caused by fallen leaves. *Wear*, 446-447(January 2019), 2020.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

[125] C. Palm Jr. Why Leaves Change Color. Technical report, Environmental Science and Forestry college, New-York, 2022.

[126] J. E. Greedan. *Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry Magnetic Oxides*. 2011.

[127] M. Letellier and V. Fleurent-Didier. Caractérisation chimique, physique et mécanique de pieux anciens. Technical report, ESTIB, Epinal, 2012.

[128] K. Nakamoto. *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, dec 2008.

[129] J. Gulmine, P. Janissek, H. Heise, and L. Akcelrud. Polyethylene characterization by FTIR. *Polymer Testing*, 21(5) :557–563, 2002.

[130] D. Lin-Vien, N. B. Colthup, W. G. Fateley, and J. G. Grasselli. *The Handbook of Infrared and Raman Characteristic Frequencies of Organic Molecules*. Elsevier Science, 1991.

[131] S. Y. Oh, D. I. Yoo, Y. Shin, and G. Seo. FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide. *Carbohydrate Research*, 340(3) :417–428, feb 2005.

[132] S. Cheng, A. Huang, S. Wang, and Q. Zhang. Effect of different heat treatment temperatures on the chemical composition and structure of chinese fir wood. *BioResources*, 11(2) :4006–4016, 2016.

[133] A. Meierhofer, C. Hardwick, R. Lewis, K. Six, and P. Dietmaier. Third body layer-experimental results and a model describing its influence on the traction coefficient. *Wear*, 314(1-2) :148–154, 2014.

[134] Y. Zhu, U. Olofsson, and H. Chen. Friction Between Wheel and Rail : A Pin-On-Disc Study of Environmental Conditions and Iron Oxides. *Tribology Letters*, 52(2) :327–339, nov 2013.

[135] A. Célino, O. Gonçalves, F. Jacquemin, and S. Fréour. Utilisation de la spectrométrie infrarouge pour une quantification rapide du taux d'humidité dans des fibres végétales. *Revue des composites et des matériaux avancés*, 24(1) :81–95, 2014.

[136] S. Cotugno, D. Larobina, G. Mensitieri, P. Musto, and G. Ragosta. A novel spectroscopic approach to investigate transport processes in polymers : The case of water-epoxy system. *Polymer*, 42(15) :6431–6438, 2001.

[137] M. L. Nelson and R. T. O'Connor. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type. *Journal of Applied Polymer Science*, 8(3) :1325–1341, may 1964.

[138] U. Olofsson. A multi-layer model of low adhesion between railway wheel and rail. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 221(3) :385–389, 2007.

[139] Lucchini RS. Wheels, 2019.

[140] MG VALDUNES. Presentation of Forged Mechanical Components. Technical report, 2010.

Cette thèse est accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2022LYSEI070/these.pdf
© [S. Guidoum], [2022], INSA Lyon, tous droits réservés

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : GUIDOUM

DATE de SOUTENANCE :

Prénoms : Samy

TITRE : Contrôle et efficacité de l'adhérence : application au contact rail-roue

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2022LYSEI070

Ecole doctorale : Mécanique, énergétique, génie civil, acoustique (MEGA, ED n°162)

Spécialité : Génie mécanique

RESUME :
Chaque automne, des incidents liés à la dégradation de l'adhérence du contact rail-roue sont signalés par les conducteurs de trains. Ils sont notamment causés par la présence de feuilles mortes en surface d'un rail. Ils génèrent des problèmes de sécurité, de nombreux retards et se produisent principalement en début et fin de journée. À ces moments, la température de l'air atteint celle du point de rosée créant de l'humidité en surface des rails. Des oxydes réagissant avec les feuilles mortes présentes génèrent des modifications physico-chimiques de ces troisièmes corps. Le passage d'un train sur cette couche organique est à l'origine de sollicitations mécaniques diminuant alors l'adhérence du contact.

L'objectif de cette thèse est alors de proposer une démarche d'étude tribologique, visant à caractériser l'adhérence d'un contact rail-roue, en présence d'un troisième corps externe organique. Pour ce faire, deux axes d'études sont suivis.
Le premier consiste en une capitalisation des résultats et limites des principaux travaux de recherche effectués sur ce sujet. Cette étape sert à créer un recueil de données tribologiques, mécaniques, et physico-chimiques. Elle est complétée par des analyses morphologiques de troisièmes corps réels prélevés en voie, à la suite d'une perte d'adhérence.

Le second axe d'étude consiste en la réalisation d'une campagne d'essais paramétriques sur le banc d'essais Triboring, tribomètre de type galet-anneau représentatif du contact rail-roue à l'échelle 1/15ème. L'étude des variations d'adhérence est ainsi effectuée en prenant en compte les couplages mécaniques et physico-chimiques liés à l'ajout d'un troisième corps organique. Ces dernières sont notamment mises en évidence au travers d'une analyse de grandeurs mécaniques (facteur de frottement), énergétiques (énergie dissipée par frottement) et spectroscopiques (liaison chimique, composition). Enfin, l'activation de plusieurs débits tribologiques met en exergue des phénomènes répétables modulant les conséquences d'une perte d'adhérence d'un train sur les distances parcourues.

Ce travail de recherche est effectué en partenariat avec SNCF Réseau, à l'aide d'outils pluridisciplinaires (tribologie, mécanique, physico-chimie) couplant l'obtention de données expérimentales (issues de voies réelles et d'essais représentatifs du contact rail-roue) à des analyses tribologiques et physico-chimiques.

MOTS-CLÉS : Mécanique des contacts, Tribologie, Contact rail-roue, Adhérence, Frottement

Laboratoire (s) de recherche : Laboratoire de Mécanique des Contacts et Structures (LaMCoS)

Directeur de thèse : Aurélien Saulot

Président de jury :

Composition du jury : Nathalie Bouscharain, Roger Gadiou, Malal Kane, Yannick Desplanques, Léo Thiercelin, Aurélien Saulot