



HAL
open science

De la dynamique ferroviaire à l'accommodation microstructurale du rail : Contribution des TTS à la réponse tribologique des aciers : Cas du défaut de squat

Samuel Simon

► To cite this version:

Samuel Simon. De la dynamique ferroviaire à l'accommodation microstructurale du rail : Contribution des TTS à la réponse tribologique des aciers : Cas du défaut de squat. Mécanique des solides [physics.class-ph]. INSA de Lyon, 2014. Français. NNT : 2014ISAL0028 . tel-01135274

HAL Id: tel-01135274

<https://theses.hal.science/tel-01135274>

Submitted on 25 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse

De la dynamique ferroviaire à l'accommodation microstructurale du rail

– Contribution des TTS à la réponse tribologique des aciers –
– Cas du défaut de squat –

Présentée devant
L'institut national des sciences appliquées de Lyon

Pour obtenir
Le grade de docteur

Ecole doctorale des sciences pour l'ingénieur de Lyon :
Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA)
Spécialité : Mécanique

Par
Samuel SIMON
(Ingénieur)

Soutenue le 17/03/2014 devant la Commission d'examen composée de MM.

Président	LEBON, F.	Professeur, LMA, Aix-Marseille Univ., France
Rapporteur	NAIT ABDELAZIZ, M.	Professeur, LML, Univ. Lille 1, France
Rapporteur	ELEOD, A.	Professeur, Univ. Technique Budapest, Hongrie
Examineur	LI, Z.	Docteur, Univ. Delft, Hollande
Examineur	BELLON, P.	Professeur, University of Illinois, USA
Encadrant	QUOST, X.	Docteur, RATP, Paris
Co-Directeur	SAULOT, A.	Maître de Conférences HDR, LaMCoS, INSA, Lyon
Co-Directeur	BERTHIER, Y.	DR CNRS, LaMCoS, INSA, Lyon
Invité	FAU, F.	Ingénieur, Responsable Services Techniques, Tata Steel, France
Invité	NIERENGARTEN, S.	Responsable Produits Rails, SNCF, France
Invité	LE SAUX, C.	Docteur, Responsable Pôle Calcul de structures, Alstom, France

Cette thèse a été préparée au sein du Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides
(LaMCoS) de l'INSA de Lyon

INSA Direction de la Recherche - Ecoles Doctorales Quinquennal 2011-2015

Sigle	Ecole Doctorale	Nom et coordonnées du responsable
CHIMIE	CHIMIE DE LYON http://www.edchimie-lyon.fr Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 ^e etage 04 72 43 80 46 Insa : R. GOURDON	M. Jean Marc LANCELIN Université de Lyon – Collège Doctoral Bât ESCPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE http://edeea.ec-lyon.fr Sec : M.C. HAVGOUDOUKIAN eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60.97 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	EVOLUTION,ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION http://e2m2.universite-lyon.fr Sec : Safia AIT CHALAL Bat Darwin - UCB Lyon 1 04.72.43.28.91 Insa : H. CHARLES	Mme Gudrun BORNETTE CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 06.07.53.89.13 e2m2@univ-lyon1.fr
EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCESANTE http://www.ediss-lyon.fr Sec : Safia AIT CHALAL Hôpital Louis Pradel - Bron 04 72 68 49 09 Insa : M. LAGARDE Safia.ait-chalal@univ-lyon1.fr	Mme Emmanuelle CANET-SOULAS INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 avenue Jean Capelle INSA de Lyon 696621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax :04 72 68 49 16 Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES http://infomaths.univ-lyon1.fr Sec :Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 ^e etage infomaths@univ-lyon1.fr	Mme Sylvie CALABRETTO LIRIS – INSA de Lyon Bat Blaise Pascal 7 avenue Jean Capelle 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 43. 80. 46 Fax 04 72 43 16 87 Sylvie.calabretto@insa-lyon.fr
Matériaux	MATERIAUX DE LYON http://ed34.universite-lyon.fr Sec : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry Ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIERE INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 83 18 Fax 04 72 43 85 28 Jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr
MEGA	MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE http://mega.universite-lyon.fr Sec : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry mega@insa-lyon.fr	M. Philippe BOISSE INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél :04.72 .43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 Philippe.boisse@insa-lyon.fr
ScSo	ScSo* http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/ Sec : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS Insa : J.Y. TOUSSAINT	Mme Isabelle VON BUELTZINGLOEWEN Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.77.23.86 Fax : 04.37.28.04.48 viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire thèse ont été menés au sein de la RATP dans le service Soutien Logistique Intégré et du Laboratoire de Mécanique du Contact et des Structures (LaMCoS) dans l'équipe Tribologie et Mécanique des Interfaces .

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du partenariat scientifique IDR2 entre RATP, SNCF et TATASTEEL.

Je remercie Messieurs D. Dureisseix, directeur du LaMCoS, et B. Bellec directeur de l'unité Voie, de m'avoir accueilli.

Naturellement, je tiens tout spécialement à remercier mes encadrants industriels et académiques X. Quost, A. Saulot et Y. Berthier pour m'avoir soutenu au quotidien et pour leur implication sans faille dans le suivi de mes travaux. Vous avez su trouver le juste équilibre entre rigueur et liberté au cours de ces trois années.

Je suis vivement reconnaissant au Professeur F. Lebon d'avoir accepté d'endosser le rôle de président de jury et aux Professeurs A. Eleod et M. Nait Abdelaziz d'avoir rapporté mon travail malgré des délais peu raisonnables. Tous mes remerciements vont également aux autres membres du jury, le Professeur P. Bellon, le Docteur Z.Li , le Docteur C. Le Saux et Messieurs S. Nierengarten et F.Fau de m'avoir fait l'honneur de faire partie du jury.

Mes plus sincères remerciements et un très grand coup de chapeau à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la tenue des essais Interface Roue Rail et au suivi de la zone d'essais de Bussy-St-Georges, les deux clés de voûte de mes travaux.

Merci également aux membres du comité scientifique IDR2, avec qui les points réguliers m'ont amené à structurer et clarifier mes idées.

Un grand merci à C. Godeau pour la formation dans l'art du polissage et C. Dayot pour le coup de pouce du départ.

Toutes ma gratitude va également vers mes collègues de l'entreprise et du laboratoire pour l'aide inestimables mais aussi les moments de détente qu'ils ont su m'apporter. Malgré mes va-et-vients, je me suis toujours senti chez moi, merci.

Je remercie ma famille de m'avoir encouragé dans mes choix. Votre présence à ma soutenance a été une grande source de motivation et un réel bonheur.

Et enfin, parce que ce n'est finalement qu'un début, merci d'avance à vous lecteurs et lectrices de lire, discuter, contredire, valider, étayer, critiquer, contester, bref, de faire vivre ce manuscrit.

Résumé

Le squat est un défaut de fatigue de contact apparaissant à la surface du rail avant de se propager en profondeur et finissant par mettre en jeu la sûreté ferroviaire. Depuis plusieurs décennies, ce défaut a été l'objet d'études principalement centrées sur les mécanismes de propagation de la fissuration. Les réseaux ferroviaires sont alors contraints de procéder à des opérations coûteuses et répétées d'opérations de remplacements ou d'abrasion mécanique de la surface des rails par meulage.

Afin de pallier le manque de connaissances sur les mécanismes d'amorçage du squat, une démarche centrée sur l'analyse tribologique locale de la bande de roulement du rail, à proximité d'un squat naissant, est mise en œuvre. Cette caractérisation révèle une anisotropie importante des couches superficielles du rail associée aux développements de Transformations Tribologiques Superficielles (TTS), appelés la phase blanche. Ces résultats témoignent des conditions de contact roue/rail particulières dans la zone d'étude, notamment d'un niveau d'efforts de cisaillement inhabituel en alignement.

Dans le but de valider ces observations, plusieurs essais sont alors effectués. D'une part les conditions de contact dans la zone de squats sont mesurées à partir d'un train instrumenté. Cet essai permet d'identifier un déséquilibre important des efforts de traction sur les bogies moteurs, à même d'induire la microstructure observée précédemment. D'autres part, la réponse tribologique de l'acier à rail aux différentes sollicitations du contact roue rail est étudiée à différentes échelles. A la fois par le suivi régulier pendant trois ans d'une zone d'essais soumise à la circulation ferroviaire réelle et par l'exploitation de deux essais menés en laboratoire : l'un sur une machine bi-disques de fatigue, l'autre sur une machine appliquant des conditions couplées de pression et de torsion à un corps d'épreuve. L'ensemble de ces essais permet de proposer Différents mécanismes d'amorçage thermo-mécaniques sont alors proposés au sein d'un schéma global de la réponse tribologique de l'acier à rail.

Mots-Clés : Réponse tribologique - squat - TTS - phase blanche - dynamique ferroviaire

Abstract

Squats have recently become recognised as one of the major rolling contact fatigue defects in modern railway networks for which there is currently no solution other than preventive grinding operations or costly rail renewal.

To better understand the entire damage mechanism of squat, A tribological and metallurgical analysis of the rolling band and the near surface layer was performed close to an incipient squat. This characterization show a significant anisotropy of the rail surface layer associated with developments of Tribological Transformation of Surface. These results reflect some specific wheel/rail contact conditions in this squat area, including an unusual level of shear forces in a straight track.

In order to validate these observations, two tests were performed. On the one hand, the contact conditions in a squat area were measured from an instrumented train. On the other hand, the tribological response of the rail steel was studied through regular monitoring of a test site subjected to railway traffic. These tests allow to identify a high imbalance of the traction forces and the presence of local slips at the wheel/rail interface. Several thermomechanical initiation mechanism of squats are then given in a overall diagram of the tribological response of rail steels.

Keywords : Wheel rail contact, TTS, squat, white etching layer, railway dynamic, tribological response

Introduction	15
Partie 1 : Vers un scénario d'amorçage du défaut de Squat.....	17
Chapitre I : Le contact rail/roue, générateur de dégradations	19
I.1 Véhicule et infrastructures ferroviaires	19
I.1.1 La ligne A du RER	19
I.1.2 Conception du matériel roulant MI2N	20
I.1.2.1 Généralités sur le MI2N	20
I.1.2.2 Gestion de la dynamique longitudinale	22
I.1.2.3 Gestion de la dynamique verticale et transversale	26
I.1.3 La voie ferrée	28
I.1.3.1 Description générale de la plateforme	28
I.1.3.2 Le rail	29
I.2 Description classique du contact roue/rail.....	34
I.2.1 Aspects mécaniques du contact.....	34
I.2.1.1 Cinématique du contact.....	34
I.2.1.2 Efforts au contact	36
I.2.1.3 Limitations d'accès à la réalité du contact roue/rail.....	39
I.2.2 Aspect thermique du contact.....	40
I.3 Conséquences du contact sur la microstructure du rail	42
I.3.1 Fatigue de contact : de la déformation élastique à la fissuration.....	42
I.3.1.1 Mécanismes théoriques d'accommodation	42
I.3.1.2 Conséquences de la fatigue de contact avant fissuration	43
I.3.1.3 Conséquences de la fatigue de contact après fissuration.....	46
I.3.2 Squat.....	48
I.3.2.1 Description classique du squat	48
I.3.2.2 Études concernant la propagation.....	49
I.3.2.3 Etudes concernant l'amorçage.....	51
I.3.2.4 Conclusion et démarche de caractérisation de l'amorçage du squat.....	52
Chapitre II : Caractérisation du défaut de squat avant fissuration	53
II.1 Identification de la fissure naissante du squat	53
II.1.1 Procédé d'ouverture du squat	53
II.1.2 Résultats	54
II.2 Vers la caractérisation d'un squat avant fissuration.....	56
II.2.1 Détails expérimentaux	56
II.2.2 Description de la bande de roulement	57
II.2.2.1 Aspect général de la bande de roulement.....	57
II.2.2.2 Description des bandes II-1, II-2 et III.....	58
II.2.2.3 Bilan des observations.....	65
II.2.3 Définition du niveau 0 de développement d'un squat.....	66

Chapitre III :	Scénario tribologique d’amorçage du squat	67
III.1	Natures, propriétés et origines de la phase blanche.....	67
III.1.1	Définitions : TTS et Phase blanche	67
III.1.2	Caractérisation de la phase blanche.....	68
III.1.2.1	Apparence et propriétés mécaniques de la phase blanche.....	68
III.1.2.2	Discussion sur la structure cristalline de la phase blanche.....	69
III.1.3	Hypothèses sur la formation de la phase blanche	71
III.1.3.1	Deux moteurs de formation : thermique et mécanique	71
III.1.3.2	Une origine plus complexe.....	72
III.1.3.3	Cas d’étude de Bussy-St-Georges	75
III.2	Scénario d’amorçage	77
III.2.1	Gradient de microstructures et amorçage de fissuration	77
III.2.2	Hypothèses et limites du scénario	79
Partie 2 :	Validation et généralisation du scénario d’amorçage du défaut de Squat... 81	
Chapitre IV :	Chapitre 4 : Essai Interface Roue/Rail	83
IV.1	Description de l’instrumentation.....	83
IV.1.1	Mesure des efforts de contact : double instrumentation.....	84
IV.1.1.1	Chaîne de mesure AEF.....	84
IV.1.1.2	Chaîne de mesure LEM.....	86
IV.1.1.3	Redondance des chaînes de mesures et validation des données	86
IV.1.2	Localisation du contact.....	87
IV.1.3	Identification de la dynamique du train : Suspensions et automate	89
IV.1.4	Bilan de l’instrumentation.....	91
IV.2	Organisation des circulations d’essais.....	92
IV.2.1	Variation de l’effort vertical.....	92
IV.2.2	Variation de l’adhérence roue-rail.....	93
IV.2.3	Variation de la vitesse et de l’accélération du train	93
IV.2.3.1	Présentation de l’essai préliminaire	93
IV.2.3.2	Résultats	93
IV.2.4	Bilan : Planning des circulations d’essais hors exploitation	95
IV.3	Résultats de l’essai	96
IV.3.1	Calcul de référence des conditions de contact et du comportement dynamique du train.....	97
IV.3.2	Etude des glissements macroscopiques de la roue sur le rail.....	99
IV.3.3	Etude des efforts moyens de contact par roue.....	100
IV.3.3.1	Les efforts verticaux Q :.....	100
IV.3.3.2	Les efforts transversaux Y :	101
IV.3.3.3	Les efforts longitudinaux X :	102
IV.3.4	Facteurs d’influence sur le déséquilibre mesuré	105
IV.3.4.1	Influence de l’effort vertical.....	106
IV.3.4.2	Influence du glissement roue/rail.....	107
IV.3.4.3	Influence du niveau de traction.....	112
IV.3.4.4	Influence des conditions d’adhérence	116
IV.3.5	Etude de la partie dynamique des efforts de contacts	117
IV.3.6	Dispersion de la localisation des contacts	120
IV.4	Synthèse et conclusion du chapitre	121

Chapitre V : Etude des réponses tribologiques de l'acier à rail	122
V.1 Essai global sur site : Suivi de la zone de Bussy.....	122
V.1.1 Description de la zone étudiée et de la méthode de suivi.....	122
V.1.1.1 Historique et géométrie de la zone d'essais sélectionnée.....	122
V.1.1.2 Disposition de la zone et méthode de suivi	122
V.1.2 Evolution de surface des rails.....	124
V.1.2.1 Aspect général des rails de la zone d'essais	124
V.1.2.2 R260 (Repère III)	127
V.1.2.3 R200 (Repère II).....	130
V.1.2.4 B360 (Repère IV)	133
V.1.2.5 Synthèse	136
V.1.3 Etat de la microstructure sous surfacique à 3 ans.....	137
V.1.3.1 R260 : Observations des coupes cristallographiques	137
V.1.3.2 B360 : Observations des coupes cristallographiques	140
V.1.3.3 Analyses EBSD	142
V.1.3.4 Bilan des observations.....	144
V.2 Essais élémentaires.....	146
V.2.1 Essais Bi-disques.....	146
V.2.1.1 Détails du dispositif expérimental.....	146
V.2.1.2 Essai préliminaire	148
V.2.1.3 Plan d'essais	150
V.2.1.4 Résultats	151
V.2.2 Essais RHEOS.....	155
V.2.2.1 Détails du dispositif expérimental.....	155
V.2.2.2 Résultats	158
V.3 Conclusion.....	160
Chapitre VI : Synthèse générale et perspectives	161
VI.1 Une modélisation tribologique adaptée au contact roue/rail	161
VI.1.1 Triplet tribologique	161
VI.1.2 Accommodation de vitesse.....	162
VI.1.3 Circuit tribologique	163
VI.2 Mise en œuvre de la modélisation tribologique	164
VI.2.1 Application au cas général	164
VI.2.2 Application au cas d'étude RATP	167
VI.2.3 Application aux cas référencés dans la bibliographie	169
VI.3 Perspectives.....	171
VI.3.1 Banc d'essais roue/rail : TriboRing.....	171
VI.3.2 Etude de la variabilité des efforts de contact roue/rail	172
Références bibliographiques	173
Annexe A : Codification UIC.....	183
Annexe B: Essais de fraisage	184
Annexe C: Description complète de la bande de roulement Extrait de [DAY10]	191
Annexe D : Validation des mesures IRR	208
Annexe E : Présentation de la soutenance de thèse du 17/03/2014	213

Introduction

Avec l'extension des grandes agglomérations et la nécessité de promouvoir un développement durable, la circulation ferroviaire est en plein essor et propose une solution pérenne, performante et sûre aux problèmes des transports urbains. Sur le réseau RATP, les prochaines années connaîtront l'ouverture de nombreuses lignes de tramway et d'un métro en rocade à travers l'Ile-de-France verra le jour dans le cadre du projet de Grand Paris Express. De leur côté, les lignes déjà existantes endureront l'augmentation des fréquences d'exploitation résultant à la fois de l'automatisation et du renouvellement des matériels roulants. À encombrement équivalent, ces derniers offrent progressivement une capacité de transport toujours plus importante combinée à des niveaux d'accélération et de freinage plus élevés.

Par conséquent, l'amélioration de l'offre de services s'accompagne de contraintes croissantes sur l'infrastructure, qui se heurte alors à l'émergence de mécanismes de dégradation du rail très rapides. Les travaux correctifs liés à ces nouveaux défauts s'additionnent à des cycles de maintenance du réseau déjà fortement contraints par les moyens matériels disponibles. À l'avenir, pour permettre une meilleure répartition de l'effort de maintenance et afin d'assurer un niveau de sécurité maximum aux voyageurs, le développement de solutions techniques préventives apparaît indispensable. Plusieurs pistes peuvent être envisagées comme une modification de la métallurgie du rail, de son profil ou de la gestion de sa lubrification. Cependant, cette étape d'application industrielle est conditionnée par la compréhension approfondie de ces mécanismes d'endommagement du rail.

En raison de son caractère potentiellement dangereux, de sa fréquence d'apparition et des difficultés à l'endiguer sous sa forme développée, une attention particulière a été portée sur l'un de ces mécanismes d'endommagement du rail, appelé squat¹. Le squat se caractérise par un affaissement localisé de la surface de roulement (représentée sur la **Figure I.1-1**) et un réseau complexe de fissures plongeantes dans le rail. De nombreuses études ont été effectuées sur la propagation de la fissure principale, néanmoins les conditions de contact responsables de l'amorçage de celle-ci ne sont pas pleinement élucidées. En conséquence, l'objectif de cette thèse est de déterminer le ou les mécanismes d'amorçage du squat, en couplant des résultats d'observations métallurgiques du rail et des résultats d'essais de dynamique ferroviaire par le biais de la tribologie.



Figure I.1-1 : Vue de surface d'un squat

¹ Le terme squat est issu du lexique ferroviaire britannique. Il provient du verbe « to squat » signifiant s'accroupir, du fait de « la grande ressemblance entre l'aspect surfacique du défaut et l'empreinte que pourrait laisser un gnome très lourd s'asseyant sur le rail » [GRA 09].

Cette étude des mécanismes tribologiques d'amorçage du squat se divise en deux parties composées de trois chapitres chacune.

La première partie consiste à formuler un scénario d'amorçage du défaut de squat observé sur la ligne A du RER à proximité de la station de Bussy-St-Georges, zone d'étude privilégiée dans ce travail de thèse.

Le premier chapitre propose une présentation du contact roue/rail et des phénomènes de fatigue de contact dans ce contexte. En particulier, le défaut de squat est introduit et les limites de la caractérisation actuelle du défaut à un stade naissant sont pointées.

Le deuxième chapitre présente l'étude de l'identification de la forme naissante d'un squat et la caractérisation des microstructures associées. Cette caractérisation révèle notamment une anisotropie importante des couches superficielles du rail associée aux développements de changements de phases solide/solide, tels que la phase blanche.

Le troisième chapitre détaille les mécanismes possibles de formation de la phase blanche et de la microstructure observée à proximité d'un squat naissant. Dans la zone d'étude, les indices récoltés à partir de la microstructure sur les conditions de contact roue/rail permettent de proposer un scénario d'amorçage du squat liant différentes échelles, celle de la microstructure et celle de la dynamique ferroviaire.

La seconde partie s'oriente vers la validation et la généralisation du scénario d'amorçage du défaut de squat établi dans la partie précédente, à la fois sur les plans de la dynamique ferroviaire et de la métallurgie.

Le quatrième chapitre expose les résultats des mesures, obtenus avec un train instrumenté, du comportement dynamique du véhicule et des conditions de contact caractéristiques d'une zone de squats. Dans cette zone d'étude, un amorçage du squat lié principalement au champ de contraintes mécaniques est ainsi établi.

Le cinquième chapitre développe, sous deux aspects complémentaires, l'étude de l'évolution de la microstructure du rail soumis aux sollicitations de la roue. Premièrement, dans le cas de conditions de contact subies, avec le suivi régulier pendant trois ans d'une zone d'essai soumise à la circulation ferroviaire. Deuxièmement, dans le cas de conditions de contact imposées, par l'intermédiaire d'essais sur tribomètres en laboratoire. Les résultats de ces essais mettent en lumière la nécessité d'élargir le cadre de l'étude pour généraliser le scénario d'amorçage du squat à d'autres zones du réseau, avec notamment la prise en compte de l'usure et des champs de contraintes thermiques.

Le sixième chapitre conclut sur l'établissement des circuits tribologiques conduisant au défaut de squat dans le contexte général du contact roue/rail et propose plusieurs perspectives de développements complémentaires.

Partie 1 :

Vers un scénario d'amorçage du défaut de Squat

Chapitre I : Le contact rail/roue, générateur de dégradations

Le squat est classiquement qualifié de défaut de fatigue de contact. Il apparaît en surface du rail après de multiples passages de roues. L'étude de ce défaut dans sa globalité impose une approche transversale entre la dynamique ferroviaire et la métallurgie. Cette approche s'effectue au travers de la tribologie qui lie ces deux disciplines et les différentes échelles d'étude associées au contact roue/rail.

Ce chapitre présente donc les différents aspects du contact rail/roue utiles à la compréhension de l'étude du squat. La première partie est ainsi consacrée à la présentation du couple formé par le matériel roulant et l'infrastructure. La seconde partie traite des conditions de contact roue/rail, et en particulier des aspects mécaniques et thermiques. Enfin, les conséquences de ces conditions sur la microstructure et l'évolution du rail après un grand nombre de cycles de contact sont introduites et mettent en perspective l'objet principal de l'étude, le défaut de fatigue de squat.

Il est à noter que ce chapitre n'a pas pour prétention d'être exhaustif sur les différents thèmes abordés, mais uniquement d'apporter les éléments de compréhension sur lesquels s'appuie le manuscrit par la suite. Par conséquent, un lecteur initié peut débiter directement sa lecture par la bibliographie du squat dans la section I.3.2. De plus amples informations sur chacun de ces sujets pourront être trouvées dans les différentes références bibliographiques évoquées dans le corps de texte.

I.1 Véhicule et infrastructures ferroviaires

I.1.1 La ligne A du RER

La ligne A du RER est la ligne du réseau express régional, longue de 109 km et traversant la région Île-de-France d'est en ouest en passant par le cœur de Paris (**Figure I.1-1**). Elle est de loin la plus chargée du réseau, mais aussi d'Europe, avec presque 310 millions de voyageurs en 2011. Sous l'agglomération parisienne, dans le tronçon central, l'infrastructure voit ainsi circuler plus de 160 000 T par jour. À l'est, sur la branche menant à Marne-la-Vallée – Chessy, où se situent les deux zones principales d'étude de ce travail de thèse (**Chapitres II à V**, voir **Figure II.2-1**), la circulation est estimée à près de 60 000 T par jour.

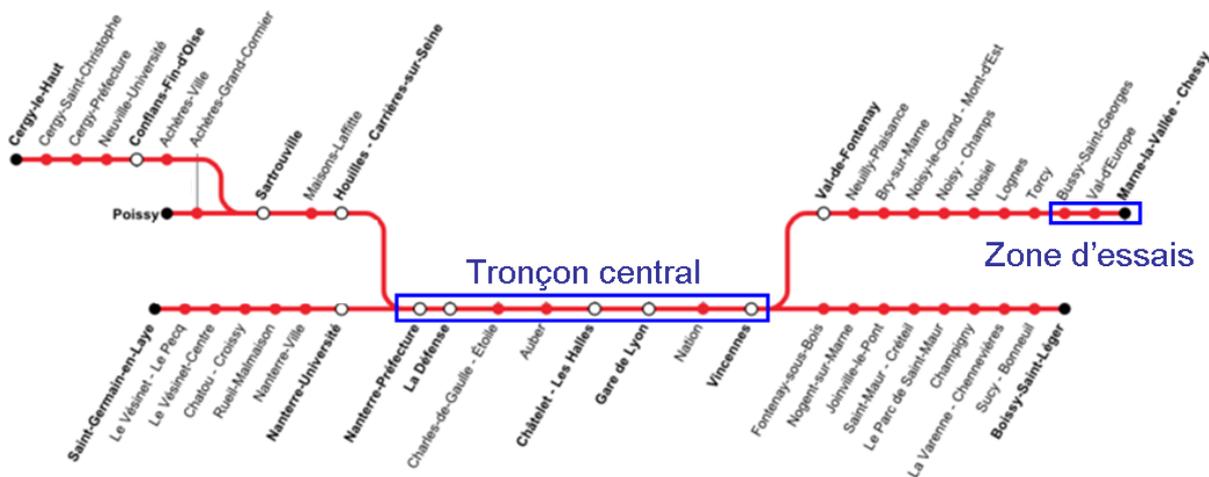


Figure I.1-1 : Plan de la ligne du RER A

Une telle exploitation de la ligne se traduit par le passage d'un train toutes les deux minutes, et conditionne indirectement les performances de traction² et de freinage des véhicules. Il existe actuellement plusieurs générations de rames servant à l'exploitation du RER À (**Tableau I.1-1**) : MS61, MI84, MI2N et plus récemment MI09. De manière générale, chaque nouvelle génération de véhicule vise à améliorer la qualité de service et offre donc une capacité de transports plus importante liée à la fois à sa motorisation et à son aménagement intérieur. Une flotte hétérogène d'engins de maintenance et de trains de travaux circule également pour assurer l'entretien de la ligne.

Nom	Masse à vide (T)	Composition	Motorisation par train	Charge à l'essieu max (T)	Vitesse max (km/h)	Puissance (kW)
MS61	148	M-P-M*	8 moteurs	16	100	1600
MI84	208	M-P-P-M	8 moteurs	18	120	2600
MI2N	288	P-M-M-M-P	12 moteurs	21	140	3900
MI09	288	P-M-M-M-P	12 moteurs	21	140	4500

* M : Voiture motorisée, P : Voiture porteuse (non-motorisée)

Tableau I.1-1 : Matériels d'exploitation circulant sur le RER A

On s'intéressera plus particulièrement, dans le cadre de notre étude, au matériel MI2N (Matériel d'Interconnexion à 2 Niveaux, voir **Figure I.1-2**) dont l'introduction à la fin des années 90 semble coïncider avec l'accélération de certains mécanismes d'endommagement du rail (voir **I.3.1.3**).



Figure I.1-2 : Photo d'un MI2N

I.1.2 Conception du matériel roulant MI2N

I.1.2.1 Généralités sur le MI2N

Pour rappel, en conception ferroviaire, le bogie est la pièce qui assure la liaison entre les essieux et la caisse. Dans le cas du MI2N, cette liaison se fait par l'intermédiaire de deux étages de suspensions. La suspension primaire est située entre les essieux et le bogie, alors que la suspension secondaire concerne la liaison entre le bogie et la caisse. Chaque voiture repose sur 2 bogies comportant chacun 2 essieux (**Figure I.1-3**).

² Les performances de traction correspondent à la capacité des véhicules moteurs de mise en mouvement l'ensemble du train à une vitesse et une accélération données.

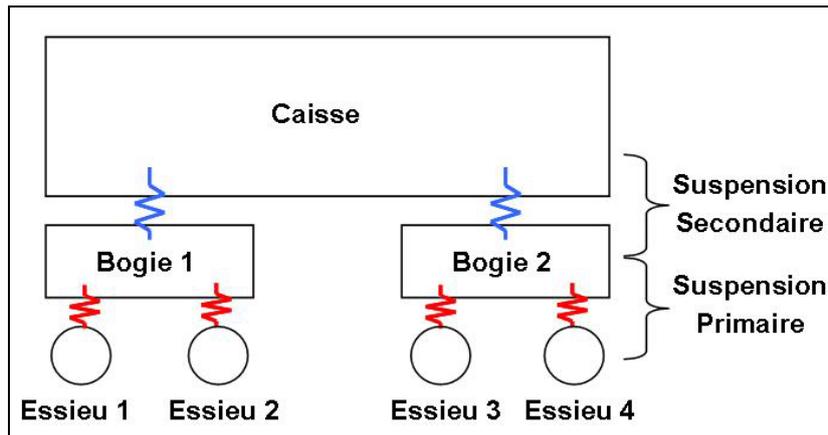


Figure I.1-3 : Schéma de principe des éléments principaux d'une voiture de train MI2N

Les caractéristiques données dans le **Tableau I.1-1** soulignent quelques-unes des spécificités du modèle de train MI2N par rapport aux générations de rames plus anciennes. Comme le laisse entendre son nom, l'aménagement intérieur du Matériel d'Interconnexion à 2 Niveaux se répartit sur deux étages. Ainsi, outre une masse à vide plus importante, la capacité théorique en passagers augmente de près de 50% par rapport à une rame MI84. En période de pointe, les passagers représentent environ un tiers de la masse totale du train et la charge à l'essieu peut alors atteindre 21 T au lieu de 15 T. Une autre spécificité du MI2N au sein de la flotte de RER concerne sa composition. Un élément de MI2N est ainsi constitué de 5 voitures à deux niveaux, dont les 3 centrales sont équipées des bogies moteurs, alors que les 2 caisses aux extrémités sont des remorques non motorisées. Elles sont respectivement appelées voitures motrices et voitures porteuses³. La dynamique longitudinale du train s'en trouve ainsi potentiellement modifiée en situation de traction et de freinage par rapport à une motorisation en tête de train comme sur MI84 ou MS61. La composition du MI2N est donnée en **Figure I.1-4**.

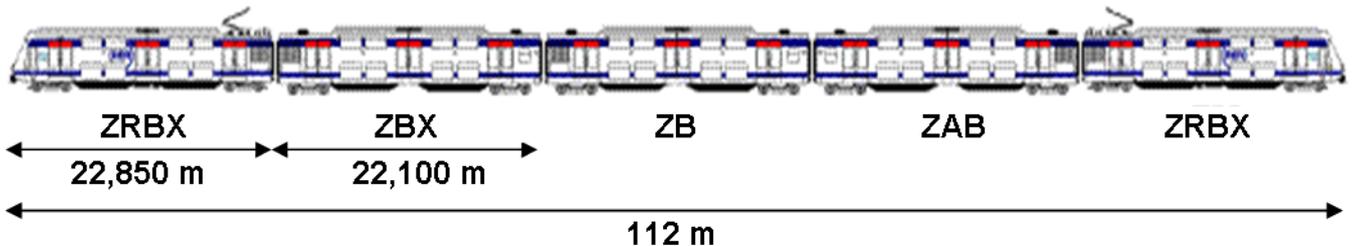


Figure I.1-4 : Composition du MI2N : ZRBX voitures porteuses ; ZBX ZB ZAB voitures motrices (ZRB, ZBx, ZB, ZAB sont les noms donnés à chaque voiture suivant leur orientation et leur motorisation)

En dynamique ferroviaire [AYA 00, AYA 03, QUO 05], les degrés de liberté d'un train sont définis à partir d'un repère centré sur la voie ferrée par trois translations et trois rotations, appelées respectivement l'avance, le pompage, le ballant et le lacet, le roulis et le tangage (**Figure I.1-5**). En dehors de l'avance, ces degrés de liberté sont considérés au mieux comme une gêne au confort des voyageurs, au pire comme un risque pour la sûreté ferroviaire. Les deux parties suivantes détailleront donc respectivement les solutions techniques retenues dans le cas du MI2N, premièrement pour gérer l'avance du train le plus efficacement possible, deuxièmement pour limiter au maximum les mouvements parasites.

³ De la même manière, on utilisera les termes essieu moteur / porteur et bogie moteur / porteur suivant la présence ou non d'une motorisation.

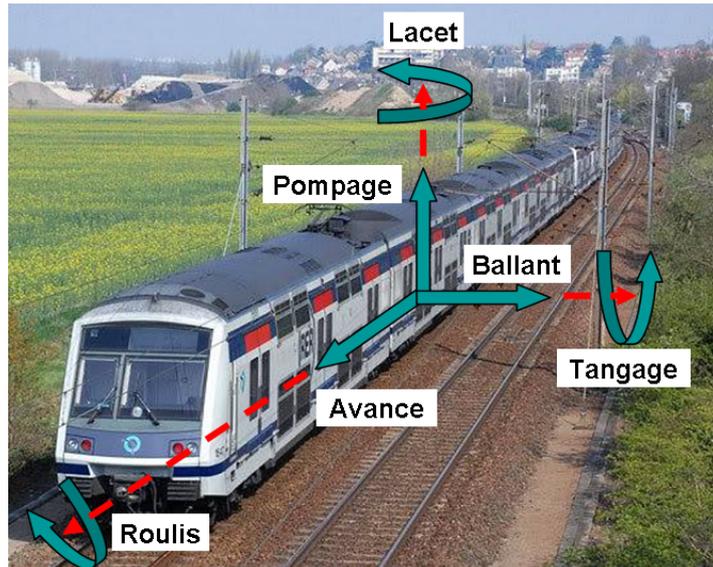


Figure I.1-5 : Définition des degrés de liberté du train (inspiré de [QUO 05])

I.1.2.2 Gestion de la dynamique longitudinale

- Dimensionnement de la motorisation et calcul de l'effort de traction :

Le but premier de la motorisation est de fournir un effort aux roues des différents véhicules moteurs, dont la somme doit être suffisante pour mettre le train en mouvement. Pour calculer la valeur que doit prendre un tel effort, on considère un train de masse M , soumis à une accélération γ et circulant dans un alignement caractérisé par une pente d'angle α (Figure I.1-6).

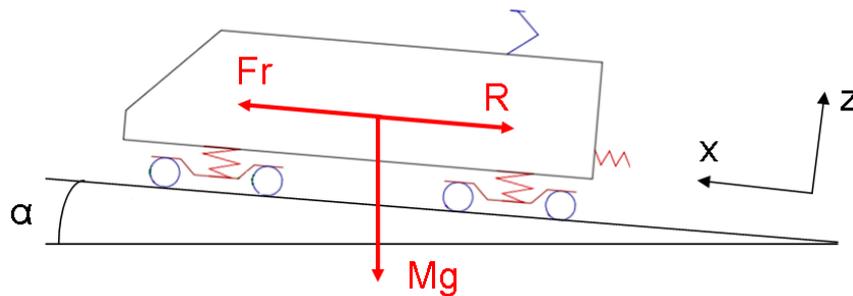


Figure I.1-6 : Bilan des efforts appliqués à un train dans un alignement

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit alors suivant l'axe x :

$$F_r - R - Mg \sin \alpha = kM\gamma \quad (1.1)$$

Avec :

- F_r : L'effort total aux jantes des engins moteurs,
- R : La résistance à l'avancement qui s'exprime en fonction de la vitesse V , sous la forme $R=(a+bV)+(cV^2)$ avec a,b,c constants. Le premier terme représente en première approche la résistance à l'avancement et au roulement, tandis que le deuxième traduit la résistance aérodynamique du train,
- $Mg \sin \alpha$: La composante de la gravité avec g l'accélération de la pesanteur,
- k : Facteur correctif qui majore légèrement la masse du train pour prendre en compte l'inertie des différentes pièces en rotation.

On ramène ensuite cette valeur d'effort au niveau du couple de l'arbre moteur C_m de l'engin de traction par la relation :

$$C_m = \frac{F_j r}{N \rho \eta} \quad (1.2)$$

Avec :

- N : nombre de moteurs de l'engin de traction,
- ρ : rapport de démultiplication entre la roue et le moteur,
- r : rayon de la roue,
- η : rendement de la transmission entre la roue et le moteur ($\eta \approx 0,98$).

Avec (1.1) et (1.2), et sur la base de paramètres tels que l'accélération maximale désirée, la vitesse d'exploitation voulue et la topographie du réseau, il est alors possible de calculer les couples nécessaires au démarrage et en régime continu. La motorisation est ainsi dimensionnée à partir de l'exploitation désirée. Dans le cas du MI2N, l'accélération maximale de $1,1\text{m/s}^2$ et la vitesse maximale autorisée de 140 km/h sont assurées par 12 moteurs asynchrones (répartis sur chacun des essieux moteurs) délivrant une puissance totale de 3900 kW .

On peut alors tracer les courbes efforts-vitesse décrivant l'effort maximal transmissible par bogie à la voie en fonction de la vitesse du train (**Figure I.1-7**).

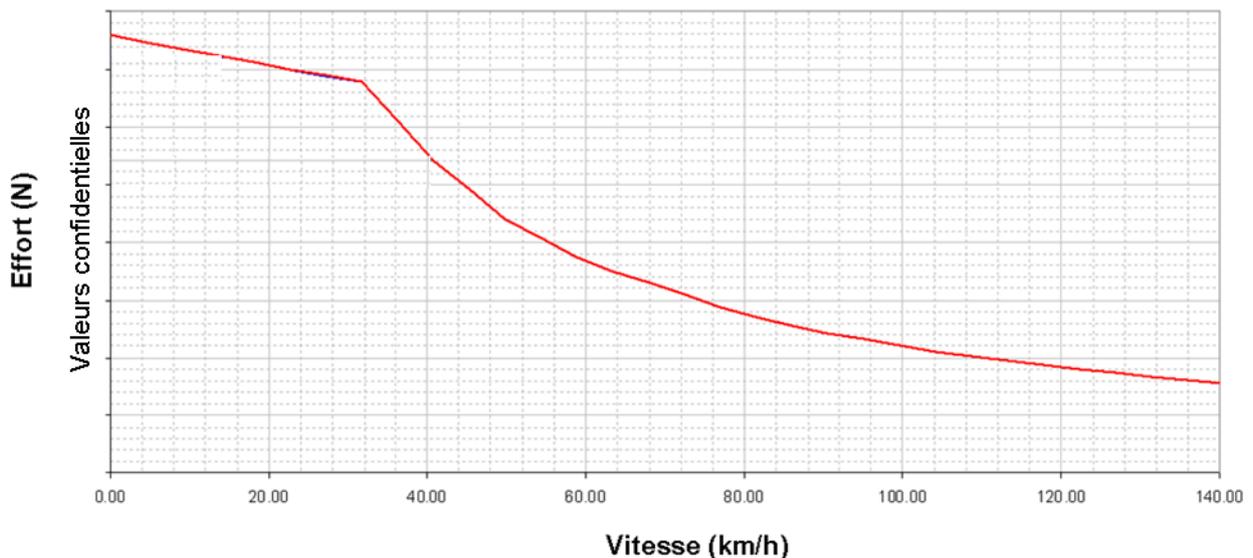


Figure I.1-7 : Courbe effort maximal en fonction de la vitesse d'un bogie moteur MI2N (Données Alstom)

Lorsque ce dernier circule à une vitesse donnée, la somme des efforts appliqués sur les 4 roues d'un bogie est calculée par un pourcentage de cette courbe en fonction de la consigne de pilotage exercée par le conducteur et de la réponse de l'algorithme d'antipatinage⁴.

Cet effort au contact est alors transmis à l'ensemble du véhicule par l'intermédiaire de plusieurs liaisons, d'abord entre les essieux et les bogies, puis entre les bogies et les caisses.

⁴ Patinage : Glissement macroscopique de la roue sur le rail lié à une adhérence insuffisante. L'effort à la roue étant alors supérieur à l'effort maximal transmissible par le contact.

- Transmission de l'effort de traction de la roue à la caisse du véhicule :

Les moteurs du train sont fixés directement sur le châssis des bogies (**Figure I.1-8**). L'effort est ensuite transmis à l'essieu (et donc aux roues frettées sur l'axe) par l'intermédiaire d'un réducteur dont le lieu d'engrènement se situe au quart de la longueur de l'essieu (**Figure I.1-9**). Une pièce fixe, appelée bielle de réaction, assure la liaison rigide entre le bogie et le carter du réducteur.

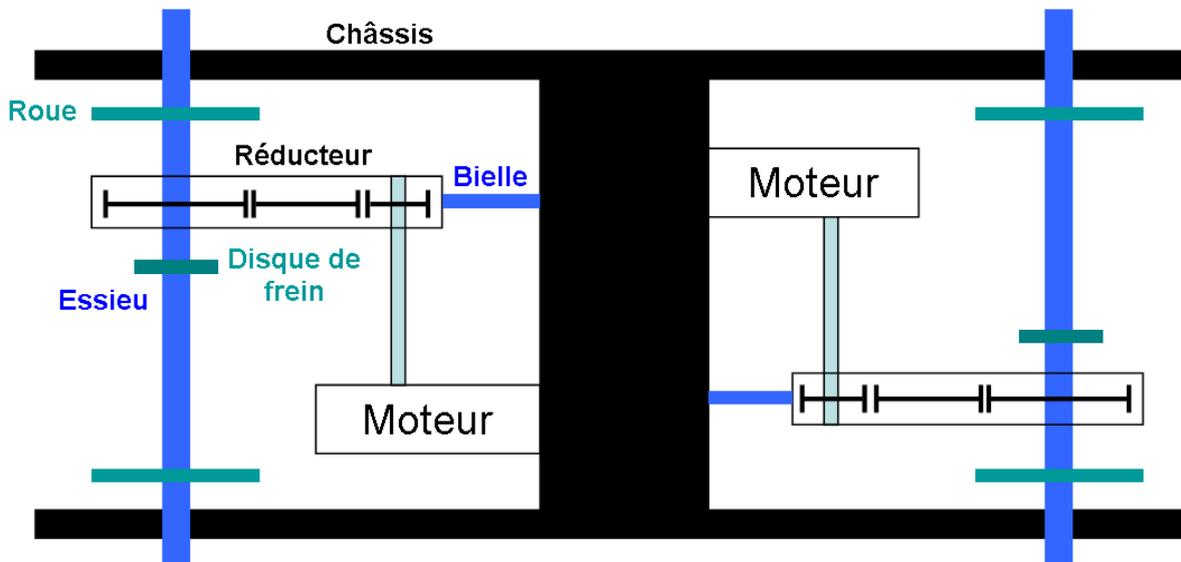


Figure I.1-8 : Schéma de principe d'un bogie moteur de véhicule MI2N (inspiré de [CAM 02])

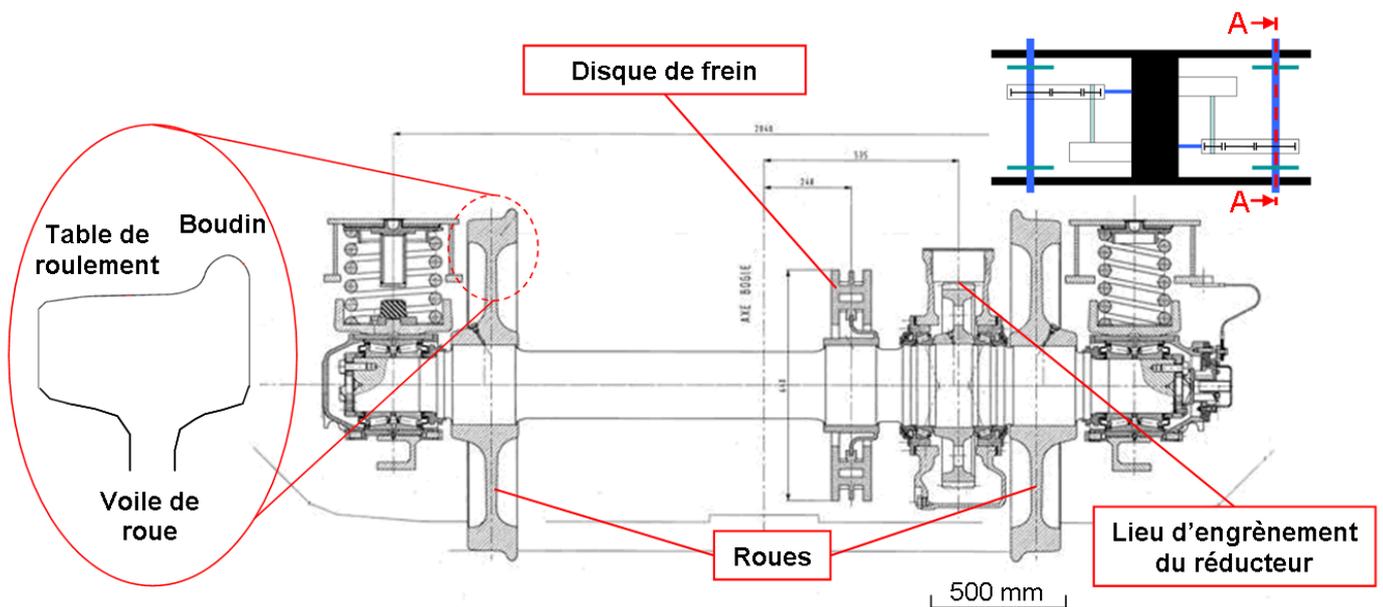


Figure I.1-9 : Plan d'un essieu moteur (Coupe A-A)

L'effort de traction est transmis par les roues au rail et entraîne le mouvement d'avance de l'essieu. Cet effort est alors repris par les boîtes d'essieu puis transmis par les boîtes à bras et la bielle de réaction moteur vers le bogie (**Figure I.1-10**).

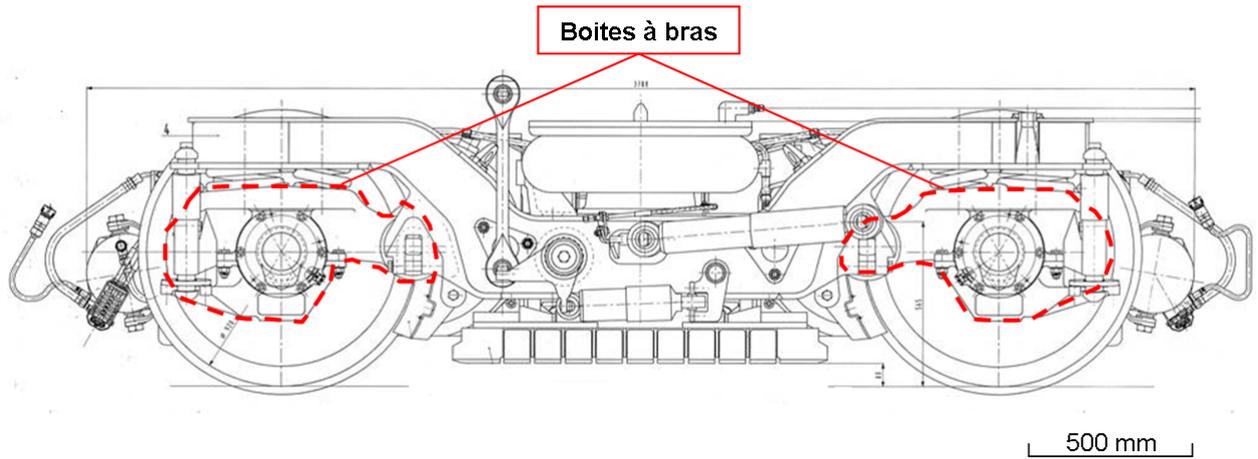


Figure I.1-10 : Vue de profil d'un bogie moteur de véhicule MI2N

Le bogie transmet alors le mouvement d'avance à la caisse par l'intermédiaire du pivot de bogie et notamment des butées horizontales (Figure I.1-11). Le train avance !

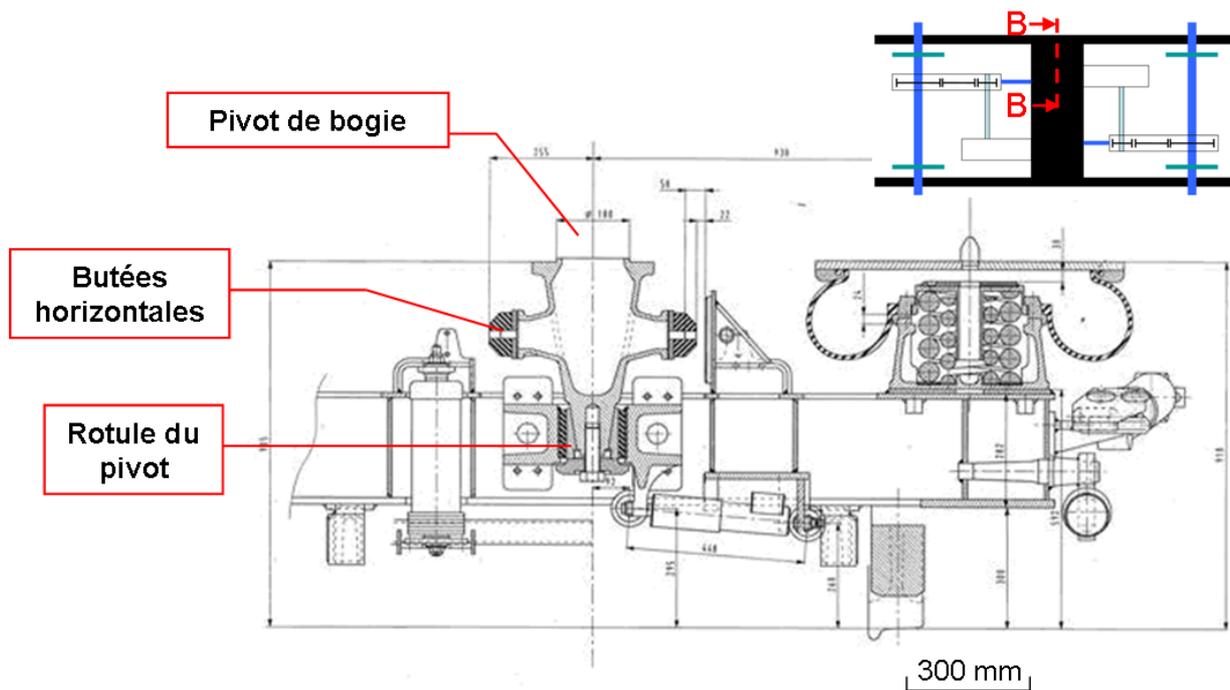


Figure I.1-11 : Plan du pivot d'un bogie moteur de véhicule MI2N (Coupe B-B)

La transmission des efforts longitudinaux entre les voitures motrices et porteuses est assurée par une barre d'attelage centrée transversalement entre les deux voitures.

I.1.2.3 Gestion de la dynamique verticale et transversale

Comme évoquée précédemment (**Figure I.1-3**), la liaison entre les essieux et la caisse se fait par l'intermédiaire de deux étages de suspensions : les suspensions primaires et secondaires.

- Suspension primaire :

La suspension primaire est composée de deux ressorts hélicoïdaux par essieu situés en bout d'essieu (**Figure I.1-12**). Les points d'accroche se situent donc entre les boîtes d'essieu et le bogie. En cas d'écrasement élevé de la suspension, l'effort est repris par une butée élastique.

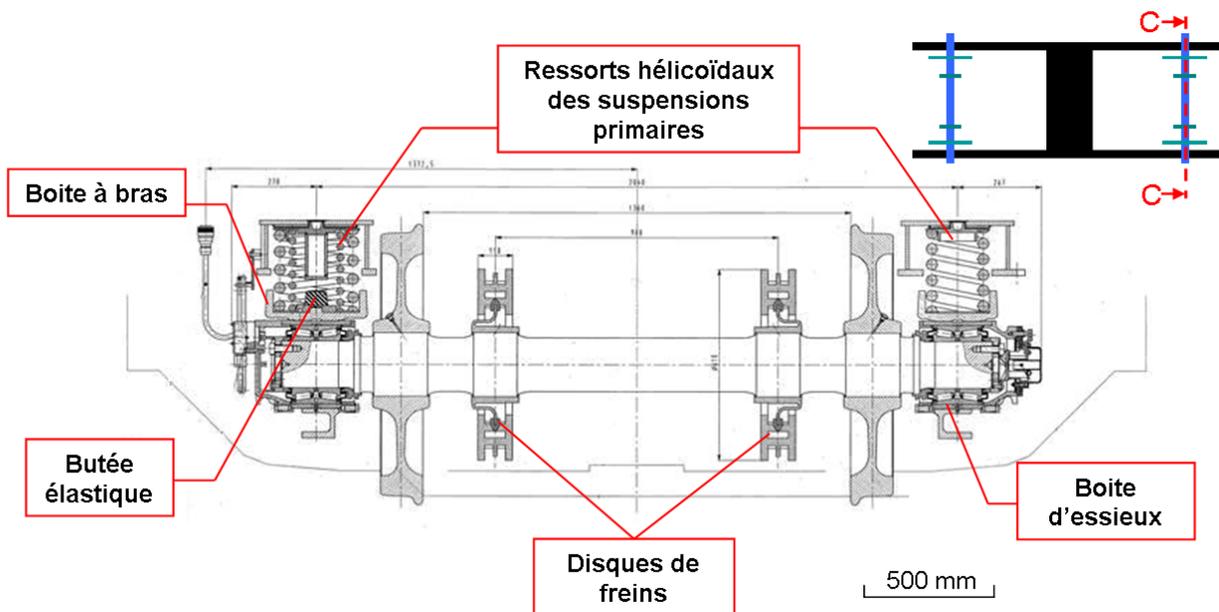


Figure I.1-12 : Plan d'un essieu porteur de véhicule MI2N (Coupe C-C)

- Suspensions secondaires :

Les liaisons entre le bogie et la caisse sont constituées de plusieurs éléments (**Figure I.1-13** et **Figure I.1-14**) :

- Pour les véhicules à deux niveaux, il faut assurer un accès au quai optimal malgré une forte variation de charge et peu d'espace dédié à la suspension. Pour ce faire, deux coussins pneumatiques sont asservis en position et fixés de chaque côté des bogies. Grâce à des valves de nivellement, la hauteur des coussins reste constante modulo l'écrasement de la suspension primaire. En cas de dégonflement, ces coussins sont complétés par deux ressorts hélicoïdaux,
- Deux amortisseurs anti-roulis fixés de chaque côté du bogie, atténuant le mouvement de rotation autour de l'axe d'avance du train,
- Deux amortisseurs anti-lacet, de part et d'autre du bogie.

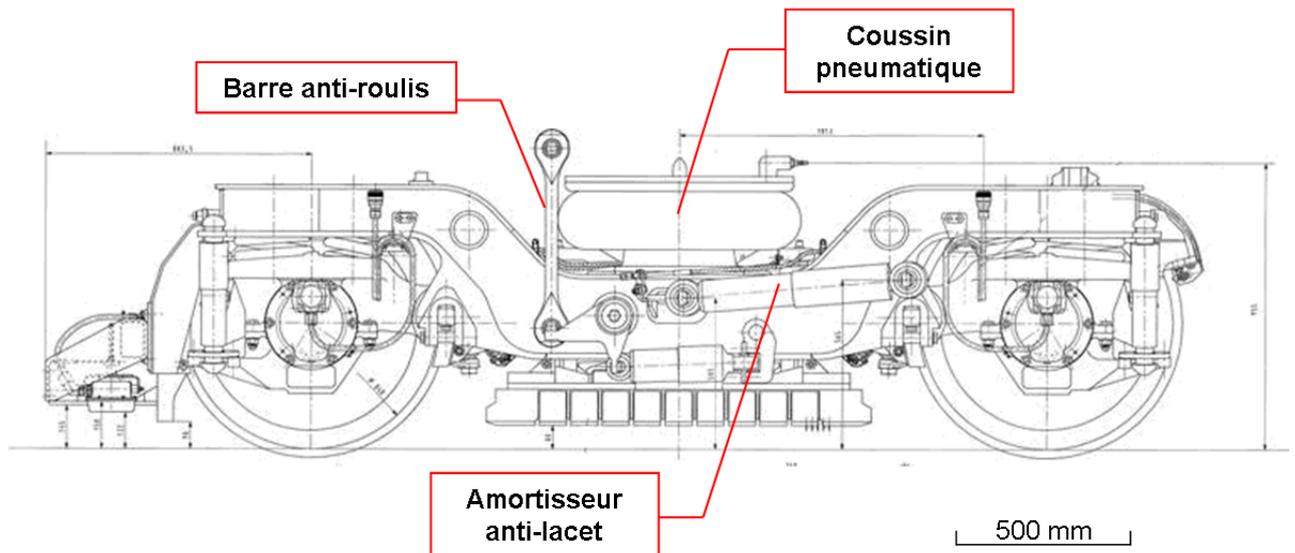


Figure I.1-13 : Vue de profil d'un bogie porteur de véhicule MI2N

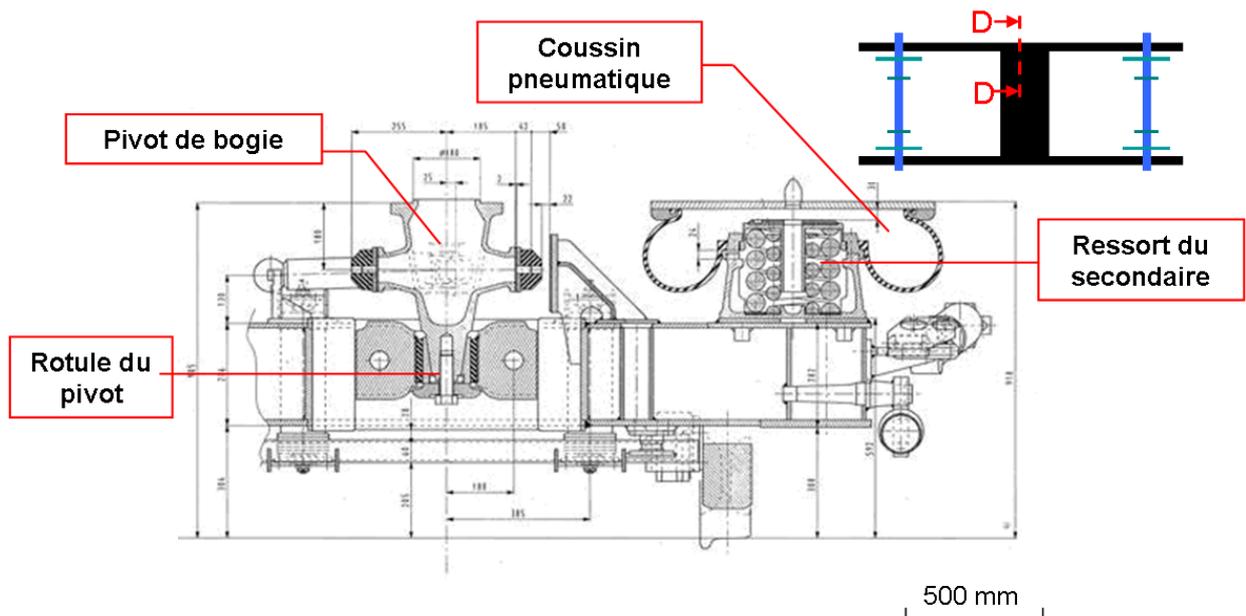


Figure I.1-14 : Suspension secondaire et liaison d'entraînement d'un bogie porteur de véhicule MI2N (Coupe D-D)

De manière générale, la raideur de la suspension primaire est plus importante que celle de la suspension secondaire. Un léger déplacement du bogie par rapport à la caisse est donc autorisé. L'intérêt est double : filtrer les vibrations caisses-bogies et faciliter le passage en courbe même pour des véhicules longs.

I.1.3 La voie ferrée

En interaction avec les véhicules, les fonctions principales de la voie sont d'assurer le guidage des bogies, de maintenir le train dans le gabarit⁵, de supporter les efforts d'inscription statiques et dynamiques du véhicule et d'assurer la continuité électrique à la fois pour la circulation et le circuit de signalisation.

I.1.3.1 Description générale de la plateforme

La voie est composée de deux files de rails dont l'écartement⁶ est maintenu constant par fixation sur des traverses espacées régulièrement. Cet ensemble repose librement sur une couche d'assise appelée ballast (**Figure I.1-15**) ou directement sur une plateforme bétonnée. Le ballast est un milieu granulaire composé de cailloux aux dimensions calibrées dont les rôles principaux sont de répartir les efforts au passage des trains pour éviter le tassement du sol, de permettre l'ancrage de la voie, d'amortir les vibrations créées par la circulation et d'assurer le drainage des eaux de pluie.

Plusieurs sous-couches intermédiaires sont disposées entre le ballast et le sol pour garantir l'étanchéité de la plateforme, améliorer l'amortissement des vibrations et maintenir une raideur de voie similaire indépendamment de la nature du sous-sol.

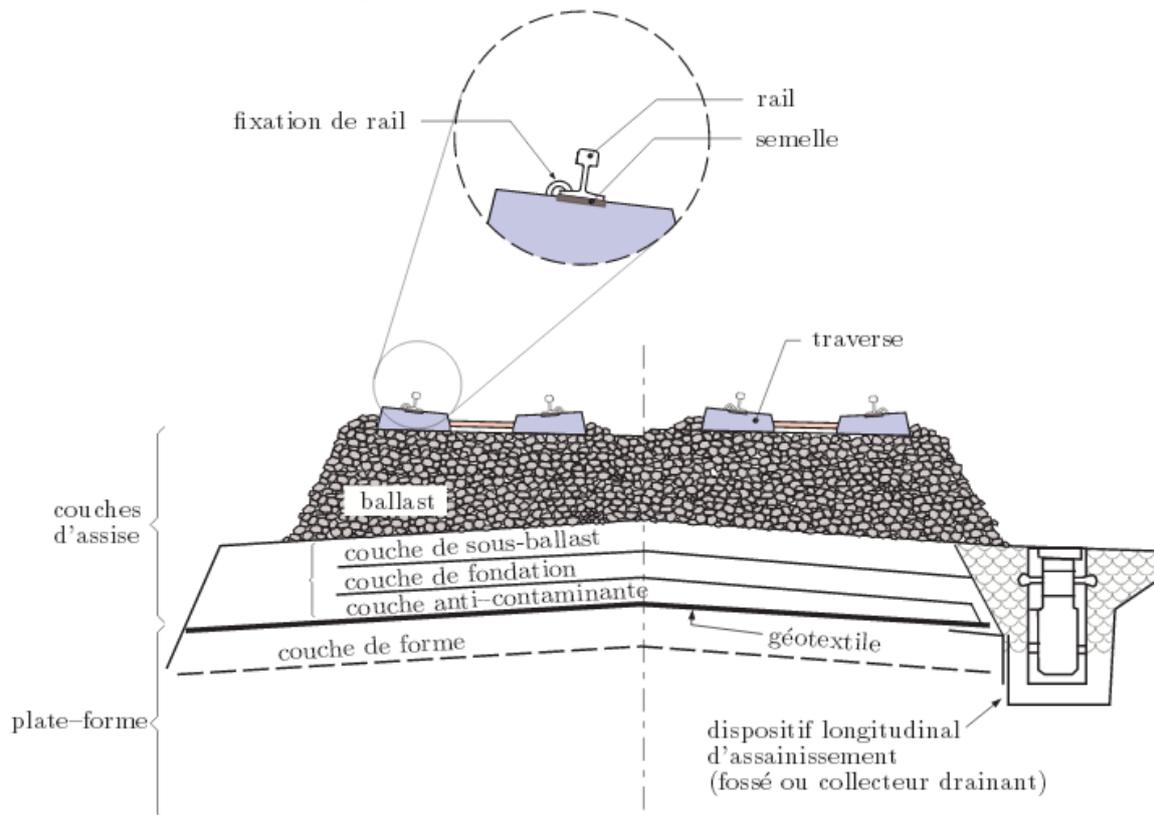


Figure I.1-15 : Structure d'une plateforme ferroviaire [KOU 09]

⁵ Enveloppe géométrique dans laquelle peut évoluer le train sans rentrer en collision avec un élément extérieur (voute du tunnel, poteau caténaire, obstacles divers...)

⁶ L'écartement nominal sur la ligne A du RER est de 1435 mm en alignement, conformément à la norme [NOR 10a].

Plusieurs types de traverses sont utilisés sur le RER A. Lorsque la plateforme le permet, les traditionnelles traverses en bois laissent peu à peu place à des traverses en béton soit monobloc, soit en deux blocs reliés par une entretoise métallique (**Figure I.1-16**). Les traverses en béton présentent une très grande espérance de vie et assurent une meilleure stabilité transversale de la voie du fait de leur poids plus élevé que celles en bois [KOU 09].

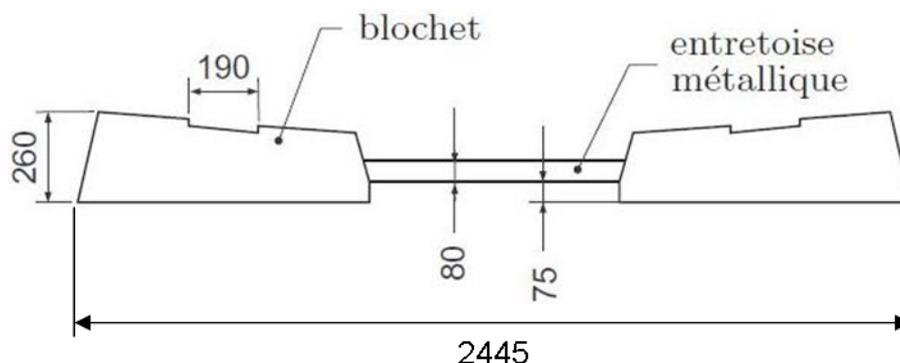


Figure I.1-16 : Traverse en béton bi-blocs [KOU 09]

En plus de l'écartement des rails, le tracé de la voie est caractérisé entièrement par 3 paramètres géométriques (**Figure I.1-17**) :

- La courbure horizontale décrivant le tracé de la ligne dans le plan XY : rayons et longueur des courbes et des alignements,
- La courbure verticale décrivant le tracé de la ligne dans le plan XZ : pourcentage des pentes et des rampes,
- Le dévers représentant le décalage vertical appliqué entre les deux files de rails pour compenser l'effort centrifuge subi par un véhicule dans une courbe.

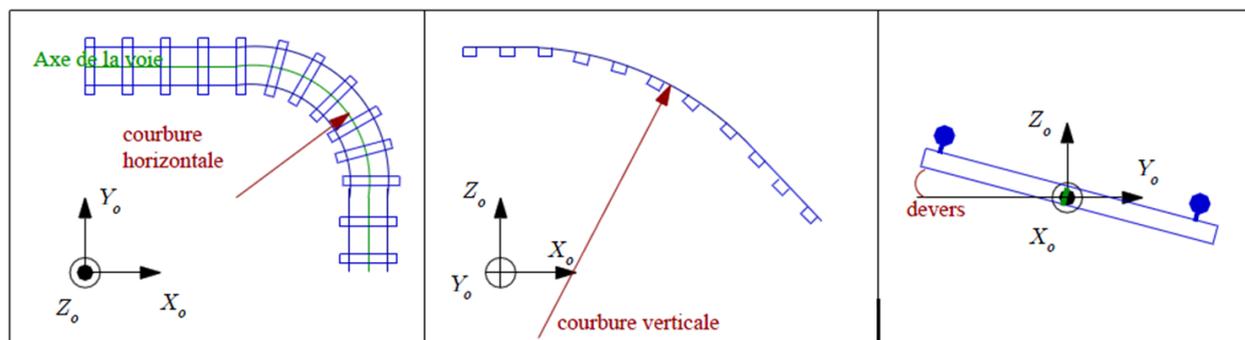


Figure I.1-17 : Paramètres du tracé de voie [QUO 05]

L'écart entre les états géométriques réel et théorique de la voie a une grande incidence sur le confort ressenti par les passagers et peut parfois remettre en cause la sûreté ferroviaire. Les paramètres géométriques de la voie doivent donc être maintenus dans une fourchette acceptable et normalisée autour de leur valeur nominale [NOR 10b].

I.1.3.2 Le rail

Le rail est l'élément de la voie en contact avec la roue. Il se caractérise par son profil géométrique transversal et sa nuance d'acier (normalisée dans [NOR 10c]). Pour chaque réseau, plusieurs types de rails peuvent coexister.

- Aspect géométrique :

Aujourd'hui sur le RER, le rail est systématiquement de type Vignole (**Figure I.1-18**). Le profil transversal comprend donc :

- Une partie supérieure appelée champignon qui supporte et guide les roues. Sa surface supérieure est appelée bande de roulement pour sa partie centrale. Celle-ci est encadrée par les deux joues du rail (aussi appelées congés),
- Une partie inférieure appelée patin qui s'appuie et est fixée sur la traverse,
- Une partie centrale verticale appelée âme qui relie le champignon au patin.

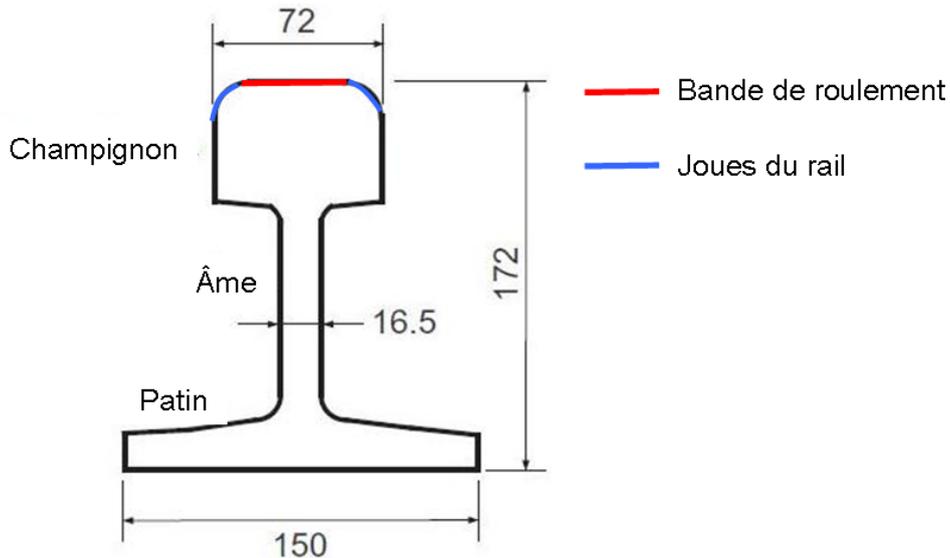


Figure I.1-18 : Schéma d'un profil d'un rail 60E1 (Plan exact Norme 13674-1 p61)

L'augmentation constante des charges à l'essieu a conduit à augmenter l'inertie verticale des rails pour en limiter la flexion. Actuellement, les profils utilisés ont une masse métrique de 60 Kg.

Il faut également noter que le rail n'est pas posé à plat sur les traverses, mais avec une légère inclinaison vers l'intérieure de la voie de $1/20^\circ$ en France. Le but est de favoriser l'auto-centrage des essieux (voir **IV.3.1**).

- Aspect métallurgique :

Plusieurs nuances d'aciers sont actuellement utilisées pour les rails du RER A, on en abordera principalement deux types : les nuances perlitiques et les nuances bainitiques. Chaque nuance possède des propriétés mécaniques (module d'Young E , coefficient de Poisson ν , dureté Vickers H_v ...) spécifiques liées à sa microstructure et son organisation cristallographique. Pour les obtenir, il faut contrôler deux mécanismes : la composition chimique et le cycle de refroidissement pendant et après les opérations de laminage.

L'acier est un alliage de type Fer-Carbone (de 0,008 à 2,14% massiques de Carbone) dont le diagramme d'équilibre, valable pour des temps de refroidissement très lents et à pression atmosphérique, est connu et maîtrisé [MUR 98] (**Figure I.1-19**).

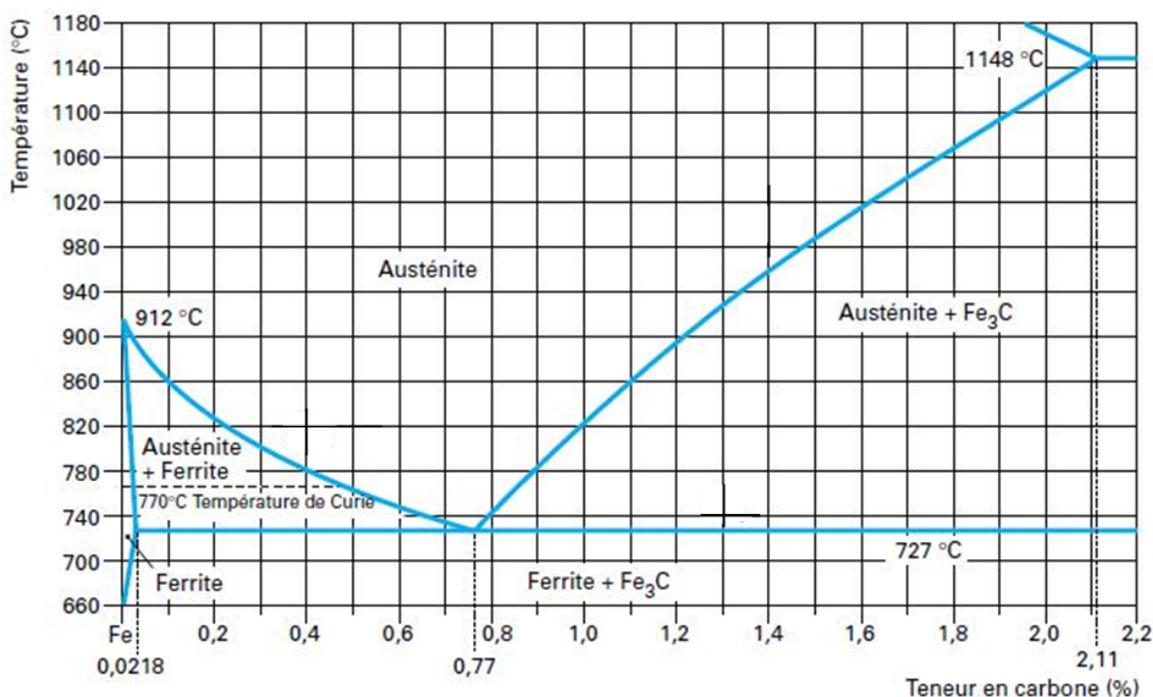


Figure I.1-19 : Diagramme d'équilibre Fer-Carbone [MUR 98]

L'austénite est une solution solide de carbone dans l'allotrope⁷ γ du fer, stable à hautes températures entre 912°C et 1392°C. Sa structure cubique faces (Figure I.1-20) centrées permet une grande solubilité du carbone.

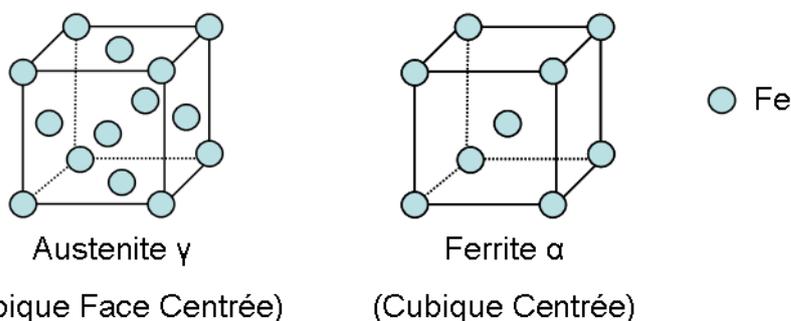


Figure I.1-20 : Organisation cristallographique de l'austénite et de la ferrite

Lors du refroidissement de l'austénite, à partir de 727°C, la structure cristallographique change et donne naissance à une structure cubique centrée appelée ferrite. Cette structure autorise beaucoup moins de lieux d'insertion du carbone, qui précipite donc sous la forme de carbures, tels que la cémentite Fe_3C .

L'agrégat ainsi constitué est appelé perlite et présente un aspect granulaire⁸ dont chaque grain est formé de lamelles alternées de cémentite (11%) et de ferrite (89%). Suivant la teneur en carbone, des joints de grains formés soit de ferrite, soit de cémentite peuvent apparaître lors du refroidissement (Figure I.1-21). Les nuances de perlite étudiées ont une teneur en carbone légèrement inférieure à 0,77% et présentent donc une très faible épaisseur de joints de grains.

⁷ L'allotropie est la faculté de certains corps d'exister sous plusieurs organisations cristallines différentes suivant les conditions environnementales.

⁸ La perlite peut se présenter sous d'autres aspects qui ne seront pas abordés dans le cadre de cette étude

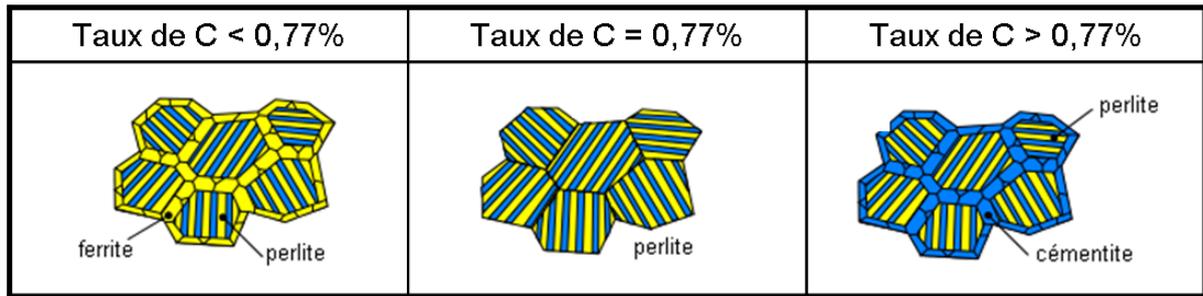


Figure I.1-21 : Structure granulaire de la perlite en fonction de la teneur en carbone (inspiré de [WIK 13])

Comme précisé précédemment, le diagramme d'équilibre Fer-Carbone n'est valable que pour des évolutions de température très lentes. Lors de cycles de refroidissement rapides, la germination des grains n'a pas le temps d'aboutir et la décomposition de l'austénite donne naissance à des constituants dits « hors-équilibre ». On utilise alors des diagrammes de transformations en conditions isothermes ou diagrammes TTT (Temps-Température-Transformations) pour prédire le résultat des transformations (**Figure I.1-22**).

Ainsi pour un refroidissement très lent avec un maintien de température entre 680°C et 450°C (Chemin n°1), on retrouve bien la structure perlitique prédite par le diagramme d'équilibre. Cependant sa taille de grains dépend de la température de refroidissement.

De la même façon, pour un maintien à une température inférieure à 450°C (Chemin n°2), on forme de la bainite, un agrégat de ferrite et de cémentite sous forme de plaquettes, dont la finesse dépend également de la vitesse de refroidissement.

Enfin pour un refroidissement rapide de type « trempe » (Chemin n°3), l'austénite se décompose en martensite, une solution solide sursaturée en carbone dont la structure est déformée en structure quadratique par l'insertion d'atomes de carbone.

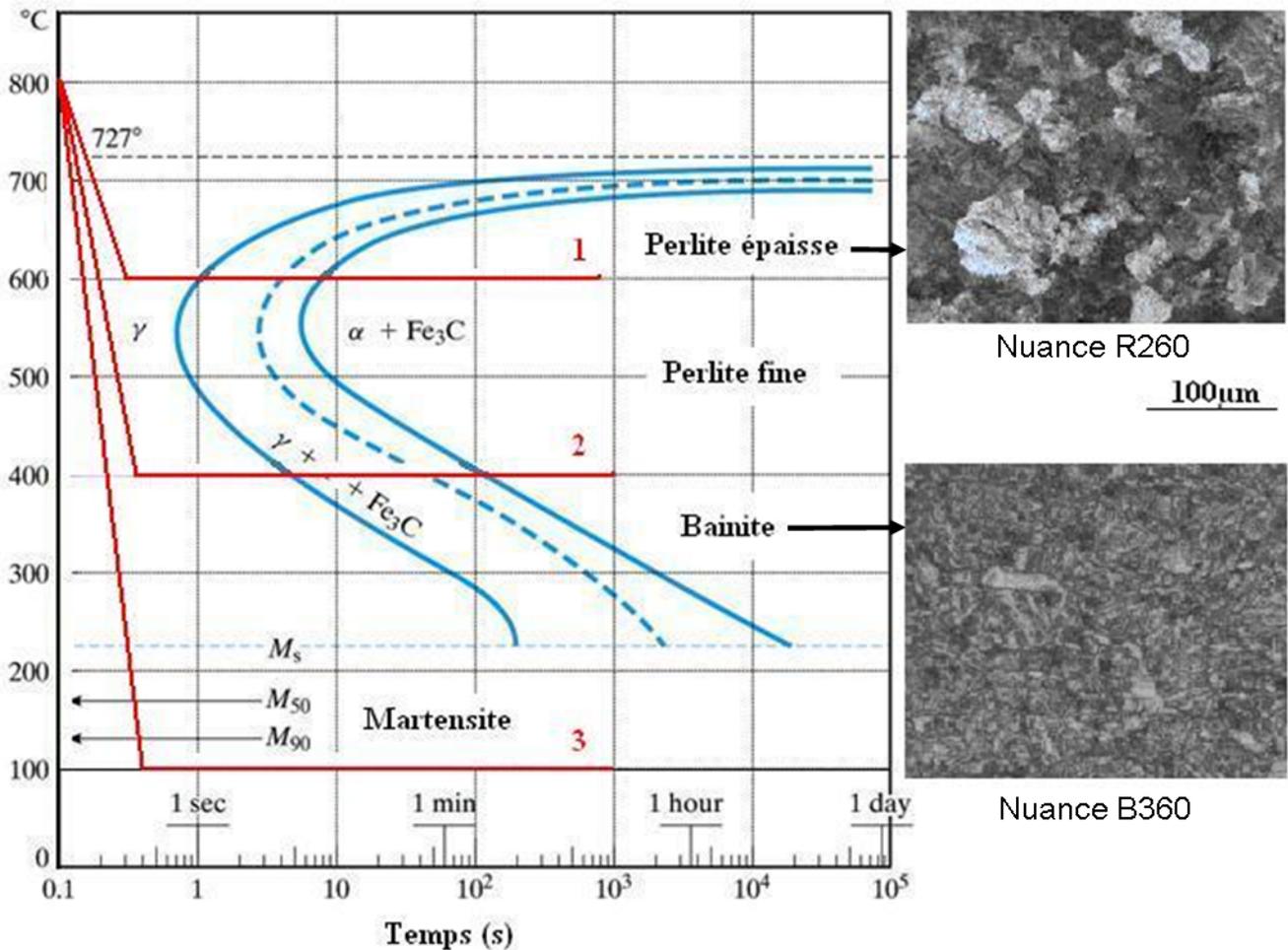


Figure I.1-22 : Diagramme TTT pour un acier à 0,77% de carbone

De plus, dans la pratique industrielle, l'alliage Fer-Carbone n'est jamais utilisé pur. D'autres éléments apparaissent dans la composition à des teneurs très faibles : soit des impuretés nuisibles que les phases d'affinage n'ont pas totalement éliminées, soit des éléments ajoutés volontairement pour assurer la stabilité de certaines phases et bien généralement pour améliorer et diversifier les propriétés mécaniques de l'alliage.

Pour conclure, le **Tableau I.1-2** récapitule les compositions chimiques pour les principales nuances perlitiques (R200, R260) et bainitique (B360) utilisées sur la ligne du RER A dans le cadre de cette étude.

Nuance	Structure	C	Mn	P	S	Si	Al	Cr
R200	Perlitique	0,40-0,60	0,70-1,20	<0,035	<0,035	0,15-0,58	<0,004	<0,15
R260	Perlitique	0,62-0,80	0,70-1,20	<0,025	<0,025	0,15-0,58	<0,004	<0,15
B360	Bainitique	0,20-0,40	1,20-1,80	<0,025	<0,025	0,80-1,80	<0,004	0,30-0,80

Tableau I.1-2 : Composition chimique des nuances d'acier (% massique) [TAT 13]

I.2 Description classique du contact roue/rail

Suite à la description de chaque acteur du couple véhicule/voie, cette partie s'intéresse à leur interaction : le contact roue/rail. Dans une première approche, ce dernier peut être considéré comme un contact élastique roulant entre la roue et le rail afin d'appliquer la description du contact de Hertz [HER 82].

La résolution du problème de contact consiste alors à déterminer en fonction des caractéristiques géométriques et des chargements mécaniques appliqués :

- la position, la forme et les dimensions de la zone de contact,
- les champs de contraintes et de déplacements dans cette zone,
- le champ de température induit par le frottement.

L'objectif de cette partie est de présenter différentes études qui ont été proposées pour résoudre les problématiques liées au contact roue/rail et d'en souligner leurs limites dans le cadre de l'étude de l'amorçage du squat.

I.2.1 Aspects mécaniques du contact

I.2.1.1 Cinématique du contact

- À l'échelle de l'essieu :

En première approximation, en négligeant les angles de roulis et de lacet de l'essieu et les déformations des solides, la position du contact roue/rail est déterminée entièrement par la position transversale de l'essieu dans la voie notée D_y (c'est-à-dire le déplacement suivant l'axe y défini sur la figure) et les profils géométriques de la roue et du rail [AYA 00, IWN 06] (**Figure I.2-1(a)**).

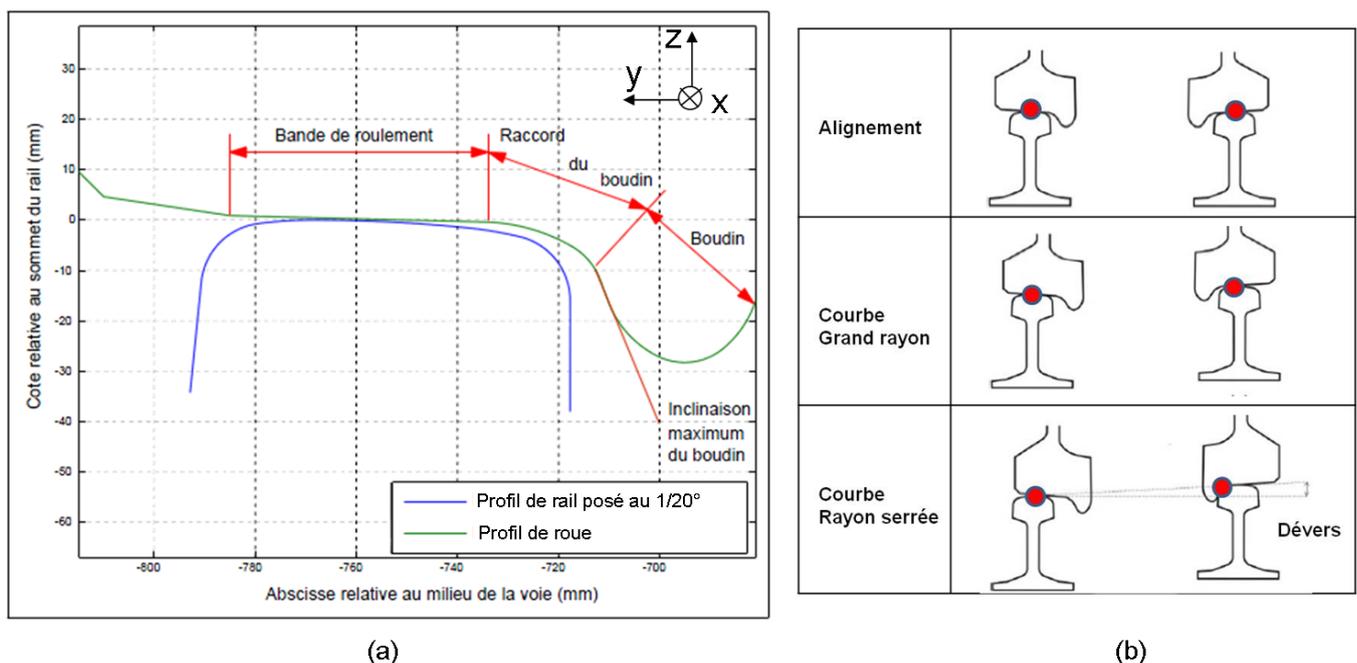


Figure I.2-1 : (a) Contact roue-rail, (b) Localisation du contact suivant l'inscription transversale de l'essieu

Ainsi, pour des profils de roues et de rails neufs, dans le cas d'un faible déplacement transversal de l'essieu (inférieur à 6 mm), le contact s'effectue entre la bande de roulement de la roue et une zone légèrement décentrée vers l'extérieur de la voie sur la bande de roulement du rail. Cette inscription, symétrique entre les files de rails droite et gauche, est typique d'une zone en alignement (**Figure I.2-1(b)**). Dans les cas des courbes, le déport de l'essieu entraîné par l'effort centrifuge vers l'extérieur du virage ramène le contact vers le congé du profil de rail en localisant le contact avec le raccord du boudin (ou le boudin lui-même dans les cas de courbes très faibles rayons).

À une position transversale de l'essieu donné, il est alors possible d'en déduire les rayons des cercles de roulements pour les roues droite et gauche. Ces rayons de roulements permettent le calcul des vitesses relatives entre la roue et le rail, appelés pseudo-glissements.

- À l'échelle du contact :

Les mouvements relatifs entre une roue et un rail sont définis par le pseudo-glissement d'avance v_x suivant l'axe x, le pseudo-glissement latéral v_y suivant y et le pseudo-glissement en pivotement v_Φ pour la rotation autour de l'axe z. Ces derniers sont déterminés dans le cas quasi-statiques par les expressions suivantes [JOH 85] :

$$v_x = \frac{V_r - V_a}{V_a}, \quad v_y = \tan \Phi, \quad v_\Phi = \frac{\omega \sin \Phi}{V_a} \quad (1.3)$$

Avec (**Figure I.2-2**) :

- ω : Vitesse de rotation de la roue
- $V_r = \omega r$: Vitesse linéaire de la roue (r étant le rayon de roulement)
- V_a : Vitesse d'avance de la roue
- Φ : Angle entre V_a et V_r
- a, b : Longueurs caractéristiques du contact (voir I.2.1.2)

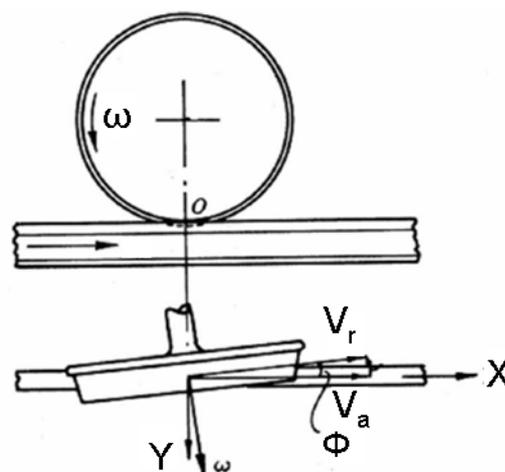


Figure I.2-2 : Mouvements relatifs entre une roue et un rail [JOH 85]

Le calcul des pseudo-glissements est nécessaire pour déterminer la valeur des efforts au contact roue-rail dans le plan tangent.

I.2.1.2 Efforts au contact

Classiquement en dynamique ferroviaire [AYA 00, QUO 05, IWN 06], l'hypothèse est faite que le calcul des efforts de contact peut être divisé en deux parties indépendantes :

- Le problème normal statique qui étudie le champ de pression et les déformations locales suite à la mise en charge de la roue sur le rail,
 - Le problème tangentiel qui étudie la distribution des efforts longitudinaux et transversaux au sein de l'ellipse de contact, en tenant compte de glissements relatifs établis entre les deux corps.
- Le problème normal :

En 1880, Hertz [HER 82] s'est intéressé au problème du « contact pressé » sans frottement entre deux solides élastiques semi-infinis, dont les surfaces présentent des courbures constantes (et donc sans rugosité). Il propose ainsi une solution analytique pour calculer la répartition du champ de pression et la géométrie du contact dans le cas d'une sphère élastique contre un massif élastique semi-infini.

En tenant compte de l'élasticité des solides, Hertz établit donc, en fonction des rayons de courbures des solides et de la charge normale N appliquée (**Figure I.2-3**), la forme elliptique du contact caractérisé géométriquement par ses demi-axes a et b :

$$a = m \sqrt[3]{\frac{3N(1-\nu^2)}{2E(A+B)}} \quad (1.4) \quad \text{et} \quad b = n \sqrt[3]{\frac{3N(1-\nu^2)}{2E(A+B)}} \quad (1.5)$$

Avec :

- m, n : les coefficients de Hertz
- A, B : coefficients fonction des courbures locales de la roue et du rail (voir **Figure I.2-3**) et donnés par :

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{xw}} + \frac{1}{R_{yw}} \right) \quad \text{et} \quad B = \frac{1}{2R_{yr}}$$

- E : Module d'Young
- ν : Coefficient de Poisson

Cette solution est généralement présentée comme valide dans le cas général du contact roue rail, moyennant quelques hypothèses simplificatrices fortes [JOH 85, KAL 67] :

- Chaque solide est considéré comme un demi-espace élastique, homogène et isotrope caractérisé par un module d'Young E et un coefficient de Poisson ν ,
- Les surfaces considérées sont du second degré (courbures constantes), continues, et non-conformes,
- Les dimensions de l'ellipse de contact sont considérées comme petites devant les dimensions et les rayons de courbure des solides,
- La force appliquant les solides l'un contre l'autre s'exerce perpendiculairement au plan tangent commun aux deux solides. Cette hypothèse exclut les cas de frottements.

On reviendra sur la validité de ces hypothèses dans notre cas d'étude dans la partie **I.2.1.3**.

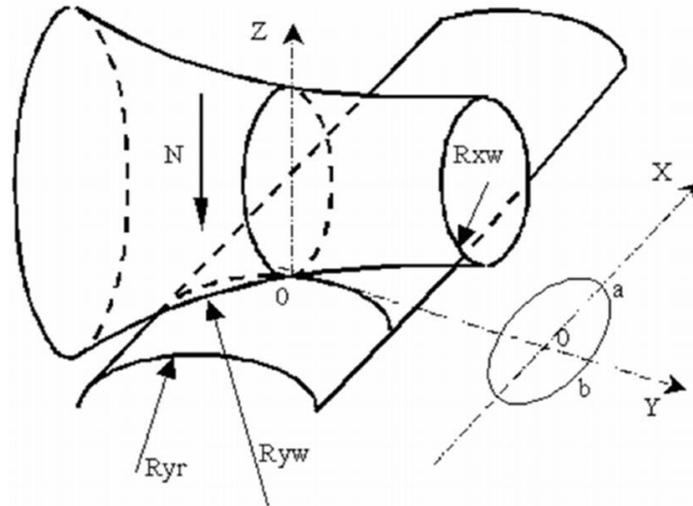


Figure I.2-3 : Caractéristiques hertziennes du contact [JOH 85]

La distribution de pression normale au sein de l'ellipse est alors déterminée par l'équation de demi-ellipsoïde suivante :

$$P(x, y) = P_m \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (1.6)$$

Avec P_m , la pression maximale de Hertz, donnée par $P_m = \frac{3N}{2\pi ab}$

Dans le cas d'une voie en alignement, le contact se situe au niveau du centre de la bande de roulement du rail et de la table de roulement de la roue. En considérant, un véhicule MI2N en exploitation et en appliquant (2.1), (2.2) et (2.3) (pour les valeurs suivantes : $N = 90$ kN, $E = 210$ GPa, $\nu = 0.25$, $R_{rx} = 0.3$ m, $R_{wx} = 0$ m, $R_{wy} = 0.5$ m), on trouve les résultats suivants : $a = 7,28$ mm, $b = 5,18$ mm, $P_m = 1,14$ GPa

- Le problème tangent :

En réalité, le contact roue/rail est un contact roulant avec frottements. Il se différencie d'un contact glissant avec frottement par une partie linéaire où l'effort tangentiel apparaît progressivement pour de faibles glissements relatifs entre les deux corps.

Physiquement [QUO 05], cela signifie que la déformation élastique des corps permet de maintenir une zone d'adhérence dans le contact tant que la vitesse relative des solides est suffisamment faible (**Figure I.2-4**). Ainsi lorsqu'un point M1 appartenant au rail rencontre un point M2 appartenant à la roue en entrant dans la zone de contact, la déformation des corps permet dans un premier temps à M1 et M2 de rester en vis-à-vis : c'est la zone d'adhérence. Puis, lorsque les contraintes tangentielles atteignent une valeur seuil (elles sont dites saturées), les points se séparent, les surfaces glissent l'une sur l'autre : c'est la zone de glissement.

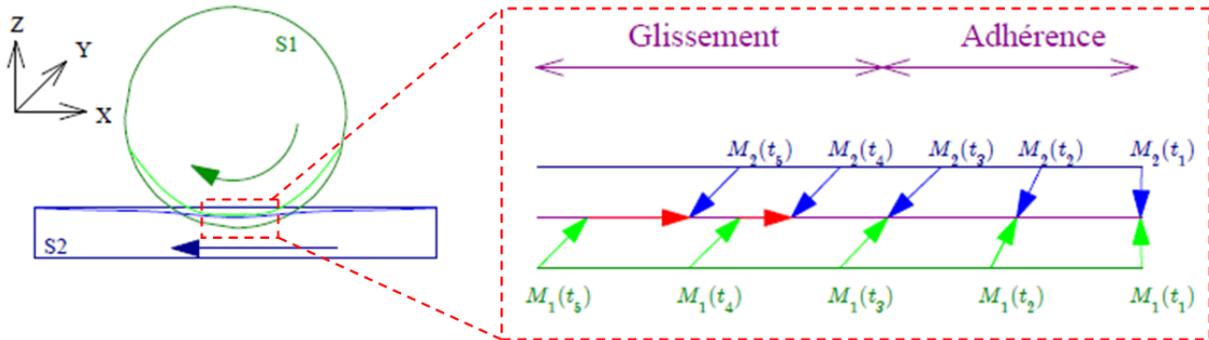


Figure I.2-4 : Zones d'adhérence et de glissement [QUO 05]

De nombreuses théories ont été développées dans le but de modéliser cette réalité physique et de donner les distributions d'efforts tangentiels en fonction des déplacements relatifs de deux corps. En 1926, Carter [CAR 26] s'intéresse au cas d'un contact linéique 2D uniquement en glissement longitudinal. Par photoélasticimétrie, il démontre expérimentalement l'existence des zones d'adhérence et de glissement au sein d'un contact entre polymères. Il en déduit la distribution théorique des contraintes tangentielles vue comme la superposition des contraintes $q'(x)$ et $q''(x)$ calculées respectivement dans les cas limites de glissement total et d'adhérence totale (**Figure I.2-5**). Il conclut alors en formulant une relation, entre l'effort tangentiel T et l'effort normal N , dépendante de la vitesse de glissement :

$$\begin{cases} \frac{T_x}{\mu N} = -k\xi + \frac{\text{sign}(\xi)k^2\xi^2}{4} & \text{pour } k|\xi| \leq 2 \\ \frac{T_x}{\mu N} = -\text{sign}(\xi) & \text{pour } k|\xi| > 2 \end{cases} \quad (1.7)$$

Avec :

- $\xi = 2(V_a - V_r)/(V_a + V_r)$: Taux de glissement,
- μ : Coefficient de frottement,
- k : Coefficient de glissement de Carter,
- T_x : Force tangentielle longitudinale du contact (en N),
- N : Force normale au contact (en N).

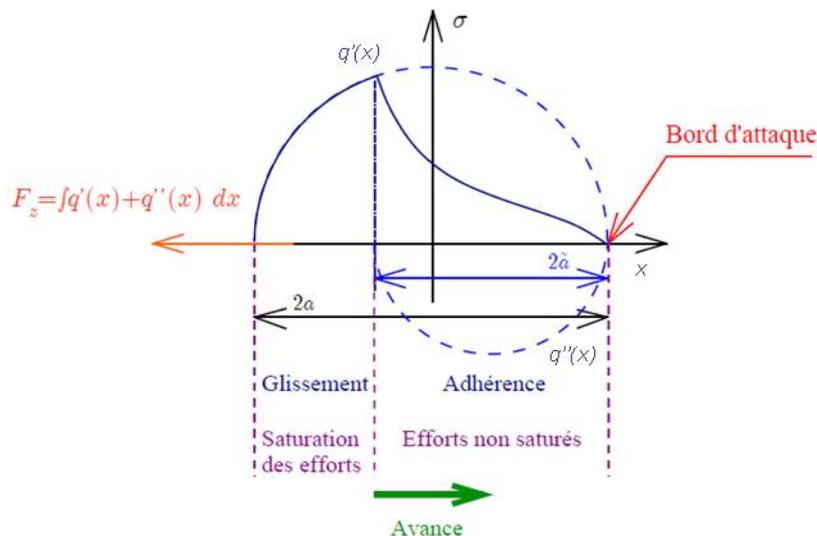


Figure I.2-5 : Théorie de Carter : Répartition des contraintes tangentielles [QUO 05]

Le modèle de Carter est alors étendu au cas des contacts elliptiques tridimensionnels par de nombreux auteurs. Ces modèles diffèrent par les lois de saturations employées et la forme de la zone d'adhésion qui en résulte. Les travaux de référence dans ce domaine sont ceux de Johnson [JOH 85] et plus particulièrement de Kalker [KAL 91] dans le cas du contact roue/rail.

I.2.1.3 Limitations d'accès à la réalité du contact roue/rail

Parmi ces travaux, les algorithmes proposés par Kalker (CONTACT et FASTSIM [KAL 91]) sont particulièrement utilisés pour les logiciels de dynamique ferroviaire, à la fois pour leurs facilités de programmation et leur rapidité de calculs. Pour autant, les théories de Kalker sont basées sur le calcul hertzien (pour FASTSIM) et sur des solides semi-infinis élastiques (pour CONTACT), dont les hypothèses ne sont pas vérifiées dans de nombreux cas réels de contact roue/rail. En effet, lors d'un contact sur le boudin de la roue, les surfaces tendent à devenir conformes et la dimension de l'ellipse n'est plus négligeable devant le rayon de raccordement. Pau [PAU 02] montre par des mesures statiques par ultrasons que le contact n'est alors plus elliptique et que la répartition du champ de pression régnant en son sein ne suit pas celle décrite par Hertz⁹.

De plus, les différentes modélisations numériques du contact sont mises en place pour des calculs de dynamique ferroviaire en permettant d'accéder rapidement et correctement à l'intégrale des efforts au sein des ellipses de contact. La réalité de la dynamique locale et de la répartition des contraintes au sein du contact n'est donc pas accessible par ces outils numériques. Ainsi expérimentalement, Nicollini [NIC 01] démontre que l'accommodation de vitesse dans un contact roue-rail réel n'aboutit pas à la répartition du contact en deux zones distinctes d'adhérence et de glissement. En effet, la répartition des contraintes tangentielles est rendue plus complexe par l'alternance de bandes hétérogènes d'adhérence et de glissement parallèles à la direction du véhicule (**Figure I.2-6**). Kalker lui-même, précise que ses théories ne reflètent pas la réalité du contact roue-rail en l'absence de prise en compte de la plasticité, de l'inhomogénéité des matériaux, de la rugosité et de l'influence du 3^e corps à l'interface (voir Partie VI.1.1) [KAL 92]. Cette connaissance précise des contraintes subies au contact est pourtant nécessaire à la compréhension des mécanismes d'endommagement du rail, comme l'a montré, par exemple, l'étude tribologique de l'usure ondulatoire [SAU 05].

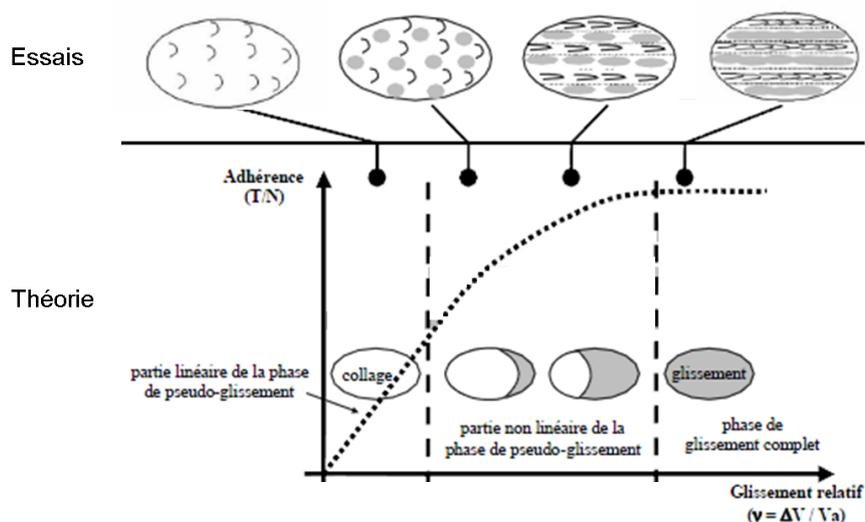


Figure I.2-6 : Répartition des zones d'adhérence et de glissement dans un contact : Théorie et Réalité

⁹ Il faut néanmoins noter que des méthodes numériques semi-hertziennes [KIK 96, AYA 05, SEB 12] ont été développées pour approcher les résultats de CONTACT avec un temps de calcul réduit.

Les limites des outils théoriques actuels pour la modélisation de la dynamique du contact roue rail proviennent en partie du manque de données expérimentales pour recaler les modèles. En effet, la mesure au plus près du contact roue rail est rendue complexe par la petite taille du contact, les pressions atteintes et les fréquences de contact élevées dans le cas de circulations rapides. Des études statiques par ultrasons [PAU 02] ou photoélasticité [HAI 63, ZAN 92] permettent d'étudier la répartition des contraintes au sein du contact, mais ne sont pas encore aptes à être transposées aux contacts en mouvement. Quant aux instrumentations embarquées sur train, elles « se limitent » actuellement en termes de résolution à déterminer les résultantes des efforts au niveau de l'ensemble du contact roue/rail [MAG 08, MAT 13].

I.2.2 Aspect thermique du contact

Lors du contact frottant entre deux corps métalliques, les déformations élastiques et plastiques génèrent une augmentation de la température au niveau de l'interface et dans leur volume respectif.

Les modèles servant à déterminer l'élévation de la température au contact roue/rail découlent d'études plus anciennes sur des géométries simples. Dans les années 40, les travaux de Blok [BLO 37a] puis Jeager [JEA 42] s'intéressent au champ de température induit par une source de chaleur ponctuelle sur un massif semi-infini. Archard [ARC 58] et Carslaw [CAR 59] développent alors ce modèle pour y inclure notamment le rôle d'une couche de « lubrifiant ».

Par la suite, différents modèles analytiques sont alors proposés pour le cas du contact roue/rail. En exploitant les transformées de Laplace, Tanvir [TAN 80] développe un modèle analytique simple pour calculer l'augmentation de température dans des contacts subissant des glissements importants. Pour un contact elliptique, l'élévation de température est donnée par l'équation :

$$\Delta T = \frac{2,26\mu P_m}{K} \sqrt{\frac{aKV}{\pi\rho C}} (\sqrt{1+S} - 1) \quad (2.7)$$

Avec :

- P_m : La pression de contact maximale de Hertz (en Pa),
- μ : Le coefficient de frottement,
- V : La vitesse du train (en m/s),
- K : La conductivité thermique (en W/sK),
- a : La demi-largeur de contact (en m),
- S : Le pourcentage de glissement,
- ρ : La masse volumique du matériau (en kg/m^3),
- C : Le coefficient de chaleur spécifique (en kJ/kgK).

Pour une circulation de MI2N, en considérant $P_m = 1,14$ GPa, $V = 30m/s$ et $S = 1\%$ et en appliquant (2.7), on aboutit (avec $K = 45$ W/sK , $a = 5$ mm, $\rho = 7.85$ kg/m^3 , $C = 637$ kJ/kgK) à $\Delta T = 74^\circ C$.

Récemment, plusieurs auteurs ont développé des modèles par éléments finis pour évaluer l'élévation de température au contact roue/rail, comme Ertz et Knothe [ERT 02, ERT 03], Dang Van [DAN 94, DAN 96], Linck et Saulot [LIN 06] et Fischer [FIS 03]. Ce dernier qui propose un modèle prenant en compte les aspérités de surface. La **Figure I.2-7** montre la comparaison des résultats obtenus par la formule analytique de (2.7) et par modèles éléments finis de Fischer pour différents niveaux de glissement de (1% à 9%) et différents temps de contact (c'est-à-dire différentes vitesses de train). Les résultats montrent une bonne similarité entre les deux méthodes, notamment à faible taux de glissement. On observe un écart de moins de 10°C pour 1% de glissement.

Au vu de ces résultats, il semble légitime d'estimer qu'en condition de circulation classique, autour 1% de glissement, l'élévation de température attendue soit de l'ordre de 100-200°C. Le champ de température est globalement limité à la taille du contact et diminue très rapidement avec la profondeur.

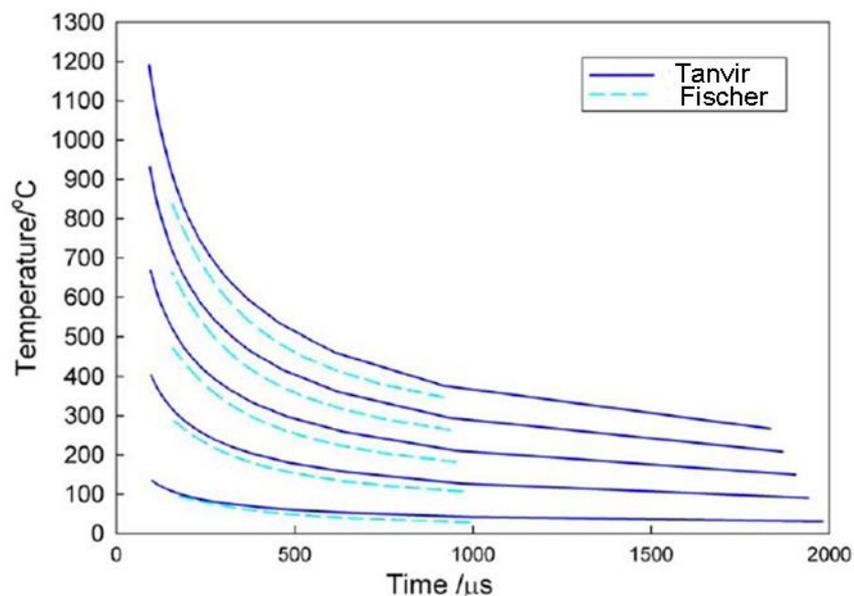


Figure I.2-7 : Température atteinte dans le contact pour différents taux de glissement et temps de contact [CAR 05]

Avec ce niveau de température global, il faut cependant ajouter l'occurrence potentielle de température flash due à la plastification brutale d'aspérités dans le contact ou à des glissements internes à la dynamique du contact [TIA 94, KNO 95]. Ce phénomène est évoqué dès les premiers modèles théoriques de Blok [BLO 37b, BLO 63] et mesuré en 1952 par Bowden [BOW 52] entre un alliage Cuivre-Nickel et un massif en acier. D'autres travaux confirment le phénomène pour d'autres couples de matériaux, comme Suzuki [SUZ 91] dans un contact sphère/disque magnétique à partir de la détection de photon émis par les aspérités lors du contact. L'ordre de grandeur mesuré est une élévation de 1000°C pendant 1μs sans augmentation notable de la température en périphérie du point chaud.

Les difficultés d'instrumentation restent un frein majeur à la mesure de telles températures flash dans le contact roue/rail. Les principales difficultés résident dans la brièveté et la localisation extrême du phénomène. Chung et Wahl [CHU 92] montrent ainsi l'incapacité de la thermographie infrarouge à détecter de telles élévations de température.

I.3 Conséquences du contact sur la microstructure du rail

Soumis aux sollicitations mécaniques (pression, cisaillement) et thermiques résultantes du contact roue/rail, la géométrie et la microstructure du rail évoluent en conséquence. L'ensemble de ces évolutions constitue la réponse tribologique du rail à son environnement. En particulier, les déformations élastiques et plastiques subies par les couches superficielles du matériau constituent une partie de cette réponse, appelée fatigue de contact.

Une fatigue de contact intense (soit après un fort nombre de cycles sous faibles sollicitations, soit après un petit nombre de cycles sous fortes sollicitations) peut aboutir à l'émergence de fissures dont la propagation sous différentes formes, appelés défauts de fatigue de contact, conduit à l'endommagement voire à la rupture du rail suivant une échelle de temps plus ou moins longue.

I.3.1 Fatigue de contact : de la déformation élastique à la fissuration

I.3.1.1 Mécanismes théoriques d'accommodation

Lors de la mise en contact de deux solides, les conditions de contact entraînent la déformation des deux corps. Suivant l'intensité des contraintes σ , différentes déformations ε peuvent prendre place. Cette distinction des mécanismes d'accommodation (**Figure I.3-1**) a été introduite par Johnson et Jefferis [JOH 63], puis développé par de nombreux auteurs dont notamment Kapoor et Johnson [KAP 94] et Böhmer et Etrz [BOH 03].

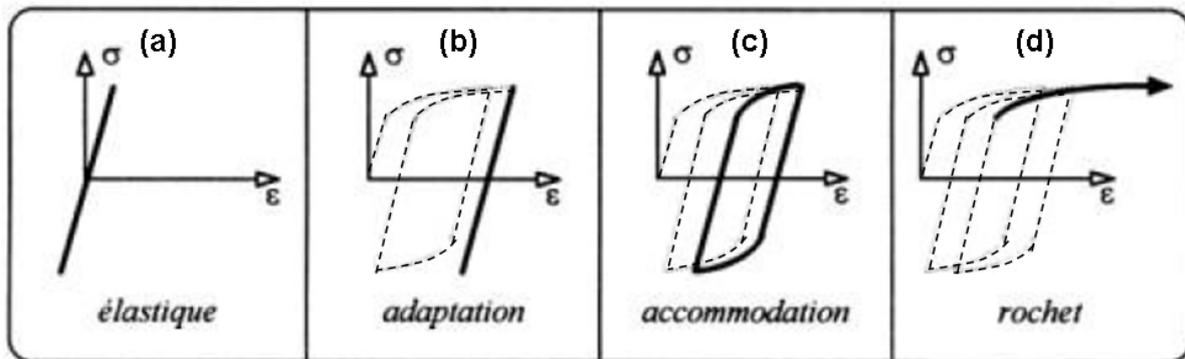


Figure I.3-1 : Réponses d'un matériau à un chargement cyclique [ZIT 12]

- Déformation élastique (Figure I.3-1a) :

Si les contraintes de contact sont inférieures au module de cisaillement du matériau, alors celui-ci se déforme élastiquement et revient à son état d'origine à la fin du cycle. Ce cas apparaît rarement dans le cadre du contact roue/rail, les conditions de contact étant bien plus grandes que la limite élastique d'un rail neuf.

- Adaptation élastique (Figure I.3-1b) :

Un rail neuf installé en voie possède une limite d'élasticité inférieure aux contraintes qui vont lui être appliquées pendant les premiers passages de roues. Il en résulte une accumulation de déformations plastiques permanentes au niveau de la bande de roulement [CLA 96, EKB 05].

Cependant cette accumulation a tendance à ralentir suite à la mise en place de plusieurs mécanismes qui tendent à protéger le matériau. Premièrement, on observe un écrouissage du matériau et donc une augmentation de la limite d'élasticité. Puis, les déformations plastiques entraînent l'introduction de contraintes résiduelles opposées à une plus grande déformation. Enfin, la plastification tend à rendre les contacts plus conformes et donc à diminuer les contraintes de contact [KAP 92].

Ainsi, dans certains cas, sous l'action des chargements, après une période d'accumulation de déformations plastiques, le rail adopte de nouveau une réponse élastique. On parle d'adaptation élastique du matériau.

- Accommodation plastique (Figure I.3-1c) :

Dans d'autres cas, après cette période d'accumulation de déformations plastiques, le niveau de contraintes reste supérieur à la limite plastique du matériau, mais est insuffisant pour déformer de manière permanente le matériau. On obtient donc un cycle de déformation plastique fermé où il n'y a pas d'accumulation nette de déformation après contact. On parle d'accommodation plastique.

- Rochet (Figure I.3-1d) :

Enfin dans les cas les plus critiques, le phénomène d'accumulation de déformation plastique ne trouve pas de situation d'équilibre et on observe un niveau de déformation plastique supplémentaire après chaque cycle. Ce phénomène similaire au fonctionnement d'un rochet en porte le nom.

- Fissuration :

Dans les cas d'accommodation plastique et de rochet, lorsque le niveau de fatigue parvient à un seuil critique lié aux caractéristiques mécaniques du matériau, il y a décohésion de la matière et amorçage de fissures [GAR 08], puis propagation de celles-ci dans le matériau [BOW 88, RIN 05]. Cet amorçage peut avoir lieu suite à un petit nombre de cycles dans le domaine de l'accommodation plastique ou lorsqu'en rochet le rail épuise son potentiel d'adaptation plastique et qu'il atteint sa limite de ductilité [CAN 03, SUR 03].

Dans la limite de leur représentativité, les essais sur machine à galets (voir V.2.1) [FLE 99, TYF 95] tendent à montrer que dans le cas du contact roue rail, l'amorçage de fissure serait principalement dû au rochet. Néanmoins, le concept de rochet est issu de lois de comportement volumique des matériaux qui ne permettent donc pas de caractériser entièrement leur comportement surfacique.

I.3.1.2 Conséquences de la fatigue de contact avant fissuration

Dans les cas d'accumulation de déformations plastiques, les évolutions du matériau observées à l'échelle macroscopique (variation de volume, variation des propriétés mécaniques comme la dureté ou le module d'élasticité... [FEL 07]) résultent de modifications subies par la microstructure du rail neuf (voir I.1.3.2) et traduisent une partie des conditions de contact.

- À l'échelle de la microstructure :

Les observations en microscopie optique des couches superficielles d'un rail soumis à la circulation des trains montrent une forte élongation unidirectionnelle des grains de perlite parallèlement à la direction de cisaillement [FRA 01, ALW 13]. À l'extrême surface, la déformation est telle, que l'aspect granulaire du matériau n'est plus discernable (**Figure I.3-2**). Cette déformation de la matrice ferritique s'accompagne également d'une réorientation des lamelles de cémentite dans une direction privilégiée et d'une réduction de l'espace inter lamellaire [GAR 08] (**Figure I.3-3**).



Figure I.3-2 : Élongation des grains de perlite dans les couches superficielles d'un rail en service [ALW 13]

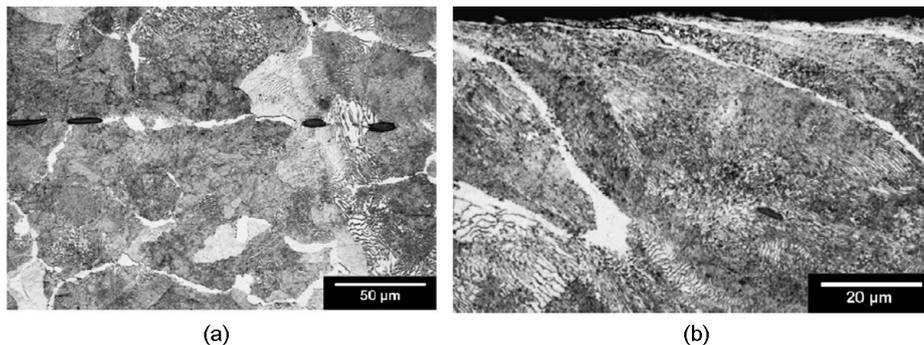


Figure I.3-3 : Observations au microscope électronique à balayage d'une éprouvette de machine bi-disques (a) avant essai, (b) après essai [GAR 08]

Rigney [RIG 86] et Tyfour [TYF 96] ont établi que les caractéristiques de la microstructure comme l'orientation des joints de grains, des lamelles ou encore la taille des grains peuvent être utilisées (en l'absence de recristallisation a posteriori du contact) pour quantifier de manière satisfaisante la déformation (et donc les contraintes subies) des couches sous surfaciques. La déformation totale en cisaillement à une profondeur donnée est ainsi estimée à partir de la tangente de l'angle (θ) formé par la direction des joints de grains déformés et des lamelles réorientées avec la normale à la surface (**Figure I.3-4**).

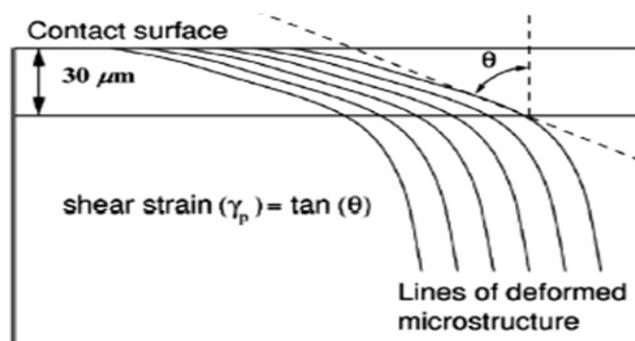
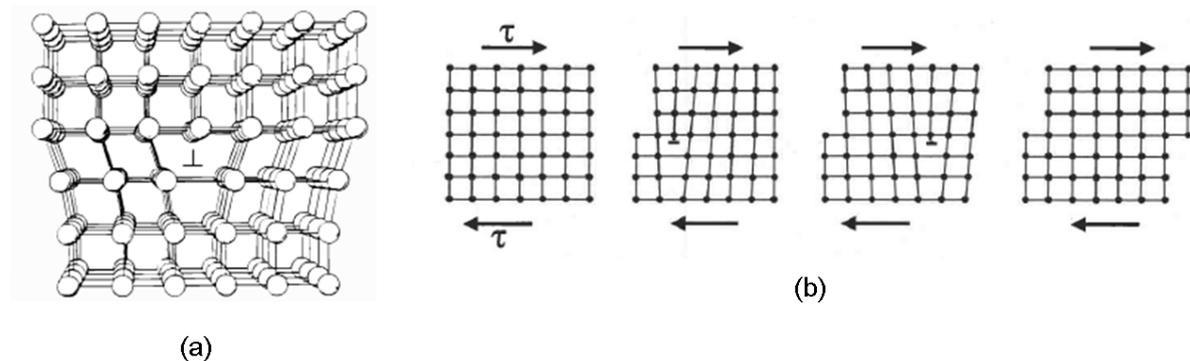


Figure I.3-4 : Mesure de la déformation de cisaillement par observation de la microstructure [ALW 13]

- À l'échelle cristallographique :

À plus petite échelle, la capacité de plastification de la matrice ferritique est rendue possible par la multiplication de défauts et de discontinuités dans la structure cristalline du matériau, appelés dislocations¹⁰ [THO 02]. La propagation progressive de ces dislocations permet le glissement des plans cristallins les uns par rapport aux autres et l'accommodation des contraintes appliquées à la structure d'ensemble [THO 02].

Géométriquement, une dislocation peut être vue comme le résultat de l'introduction d'un demi-plan à l'intérieur d'un cristal parfait (**Figure I.3-5(a)**). Le mouvement d'une dislocation (**Figure I.3-5(b)**) est dit conservatif, car il s'effectue de proche en proche par la rupture et le recollement des liaisons atomiques sans transport de matières [LOU 10b].



**Figure I.3-5 : (a) Structure d'une dislocation [LOU 10a],
(b) Déplacement par glissement d'une dislocation pour un réseau cristallin soumis à un cisaillement τ [LOU 10b]**

Les contraintes introduites par une dislocation facilitent la diffusion des atomes étrangers (impuretés ou éléments d'alliage) ne faisant pas partie du réseau cristallin. Par exemple, sur la **Figure I.3-5(a)**, la partie supérieure du réseau travaille en compression alors que la partie inférieure travaille en traction, certaines liaisons interatomiques se retrouvent donc momentanément affaiblies et permettent la diffusion des atomes interstitiels.

Enfin au stade du rochet, la limite de ductilité atteinte par le matériau avant fissuration correspond à un état du réseau cristallin où le nombre de dislocations est tel que leur glissement simultané aboutit au blocage d'une partie d'entre elles contre divers obstacles (joints de grains, autres dislocations ou précipités...) [THO 02]. Alors, la dureté du matériau augmente et devient moins ductile et plus cassant, il y a fissuration.

¹⁰ Plusieurs types de dislocations existent suivant leur géométrie, seule la dislocation coin sera abordée dans cette partie.

I.3.1.3 Conséquences de la fatigue de contact après fissuration

Après leur amorçage, les fissures se propagent en fonction de la microstructure [GAR 08, GAR 09], des contraintes résiduelles et des conditions de contact [ZER 09] sous différentes formes regroupées sous l'appellation de défauts de fatigue de contact. Suivant la direction de propagation de la fissure, il y a alors deux possibilités. Soit la propagation a une forte composante horizontale et reste globalement parallèle à la surface du rail, soit la fissure est plongeante et se poursuit dans le cœur du rail. Pour un amorçage proche de la surface, le premier cas risque de donner lieu à un écaillage du rail (**Figure I.3-6**), c'est-à-dire à l'arrachement surfacique de particules de matière plus ou moins grosses [SNC 02]. Le second, beaucoup plus pénalisant en termes de sûreté ferroviaire, peut dégénérer et conduire à la rupture du rail. L'ensemble de ces défauts est décrit dans le catalogue des défauts de rail de l'Union Internationale des Chemins de Fers [UIC 02]



Figure I.3-6 : Écaillages multiples de la bande de roulement de rail [SNC 02] Code UIC¹¹ 222

Le type de défauts de fatigue produit est principalement lié à la localisation du contact sur le champignon. Les champs de contraintes mécaniques et thermiques associés (voir I.2) à cette position conduisent en effet à des mécanismes d'endommagement spécifiques. Schématiquement, sur le réseau RATP, chaque géométrie de voie développe un type de défaut de fatigue principal :

- Courbes serrées : Tâche Ovale Décentrée (**Figure I.3-7**). Code UIC : 211

La tâche ovale décentrée est une fissuration progressive d'origine interne. L'initiation prend place à quelques millimètres sous la surface, à partir d'une position très décentrée sur la bande de roulement correspondant à un contact sur le rayon de raccordement du boudin de la roue. La fissure peut se développer à partir d'une inclusion non métallique ou d'un flocon d'hydrogène inséré dans la microstructure perlitique [SNC 02].

- Courbes larges : Head Check (**Figure I.3-8**). Code UIC : 2223

Ce défaut de surface apparaît au niveau du congé de roulement du rail. Il se manifeste par des amorces de fissures fines se développant en parallèle, avec une périodicité de 1 mm à plusieurs centimètres, selon un angle de 45° par rapport au sens de circulation [SNC 02]. Au cours du temps, les fissures peuvent progresser vers le centre de la table de roulement et en profondeur provoquant une délamination des congés de roulement. Le Head Check est classé en 3 niveaux de dangerosité établis à partir de la longueur des fissures de surface.

- Alignement : Squat (**Figure I.3-9**) (Voir section suivante) Code UIC : 227

¹¹ Chaque défaut est classé par l'UIC suivant son emplacement, son orientation et sa nature. L'explication de la codification est donnée dans l'Annexe A

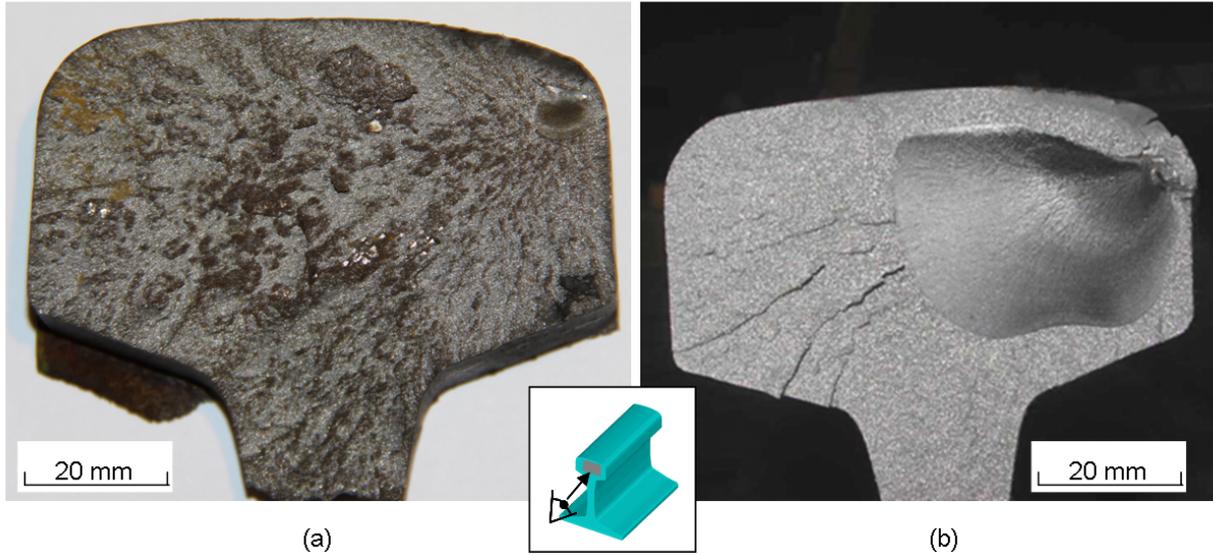


Figure I.3-7 : Tâche ovale décentrée (a) Faible propagation (b) Forte propagation

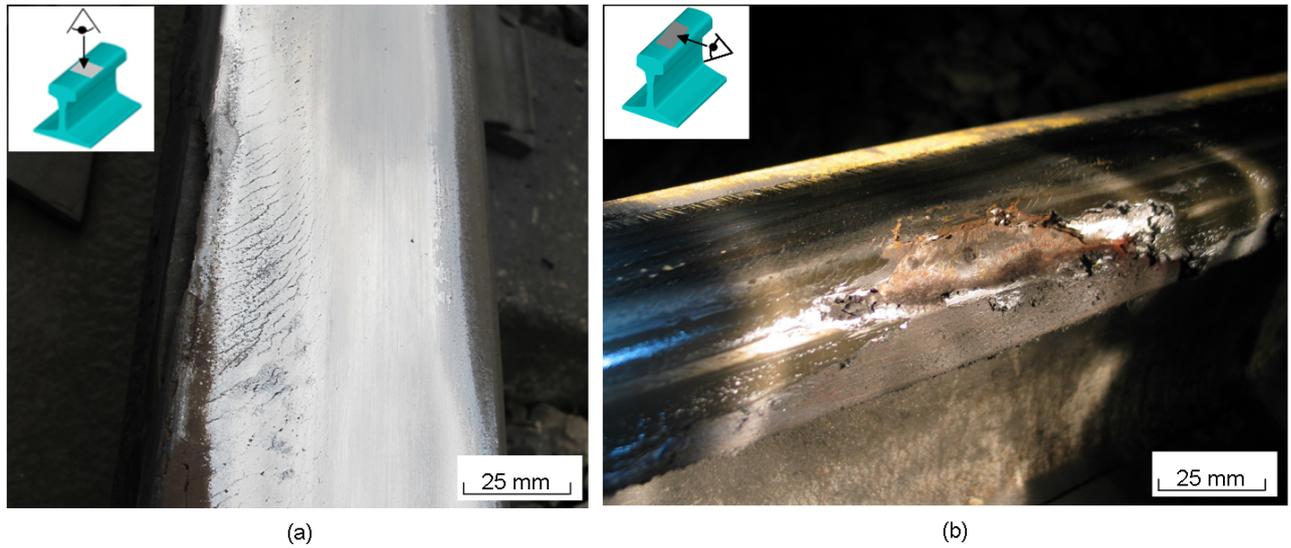


Figure I.3-8 : Head Check : (a) Niveau 2, (b) Niveau 3



Figure I.3-9 : Vue de surface d'un squat

I.3.2 Squat

Tandis que des solutions émergent pour prévenir et traiter les défauts de fatigue en courbe. Faute d'une compréhension suffisante, il n'existe actuellement aucune alternative crédible à des opérations coûteuses de meulage [GRA 05] ou de retrait du rail au défaut de squat.

I.3.2.1 Description classique du squat

Le squat est un défaut apparaissant sur la bande de roulement du rail. La forme développée du squat est décrite dans le catalogue des défauts [UIC 02] de rail de l'Union Internationale des Chemins de fers (UIC) comme un élargissement et un affaissement local de la table de roulement sous forme elliptique, accompagnée par une tache noirâtre en son centre et de deux fissures en V orientées vers les joues du rail (**Figure I.3-10a**). L'axe principal de l'ellipse, décrivant la longueur du défaut, peut varier de 20 à 150mm. Le défaut est ainsi classé selon 3 niveaux de développement suivant sa longueur : « léger », « modéré », « sévère » [CAN 96, KER 08, LI 08].

Parfois isolé, notamment au niveau des soudures de rails, il existe un stade plus critique, lorsque le squat se développe « en colonie » (**Figure I.3-10b**) formant alors de véritables chapelets de défauts le long du rail avec une très forte densité (supérieure à 10/mètre) dans les zones les plus touchées [RAT 10]. À première vue, ces colonies ne présentent pas de période distincte ou de lien entre la file intérieure de rail et la file extérieure. Le phénomène n'est donc ni périodique ni issu de transfert de conditions de contact entre les files de rails

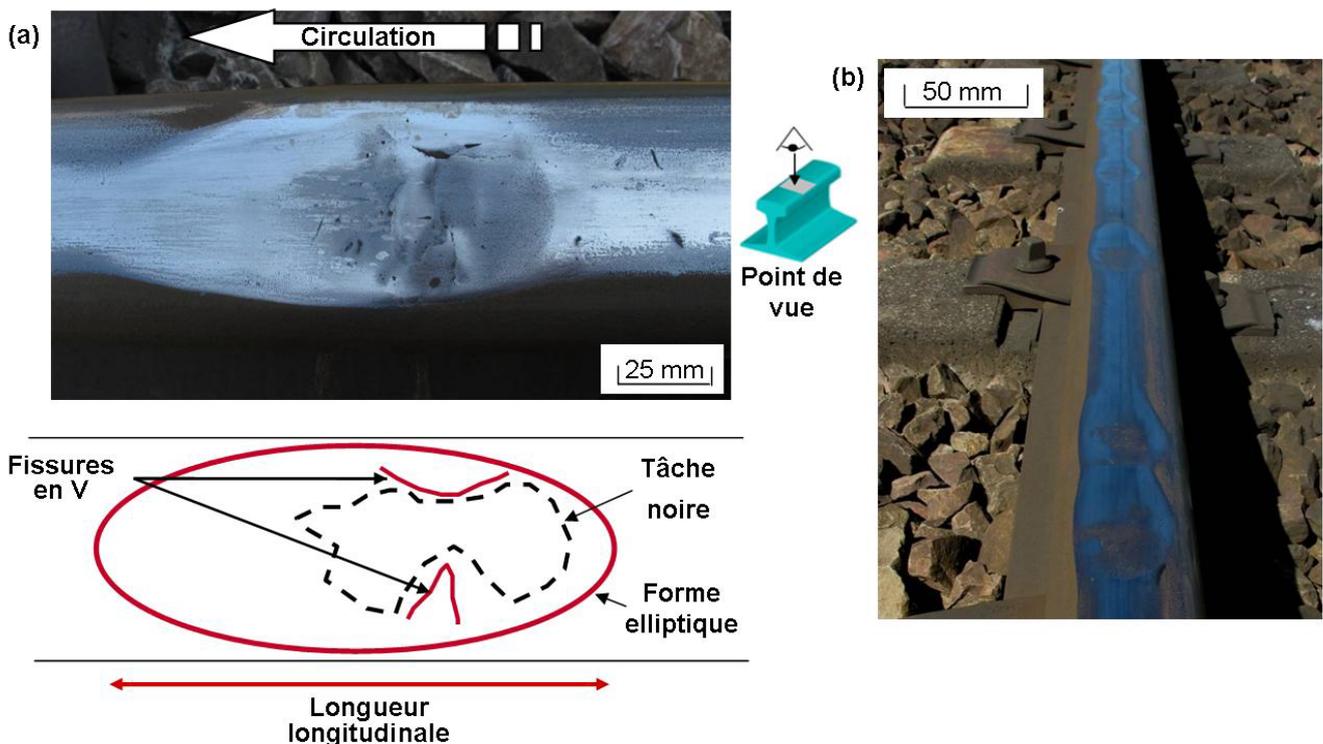


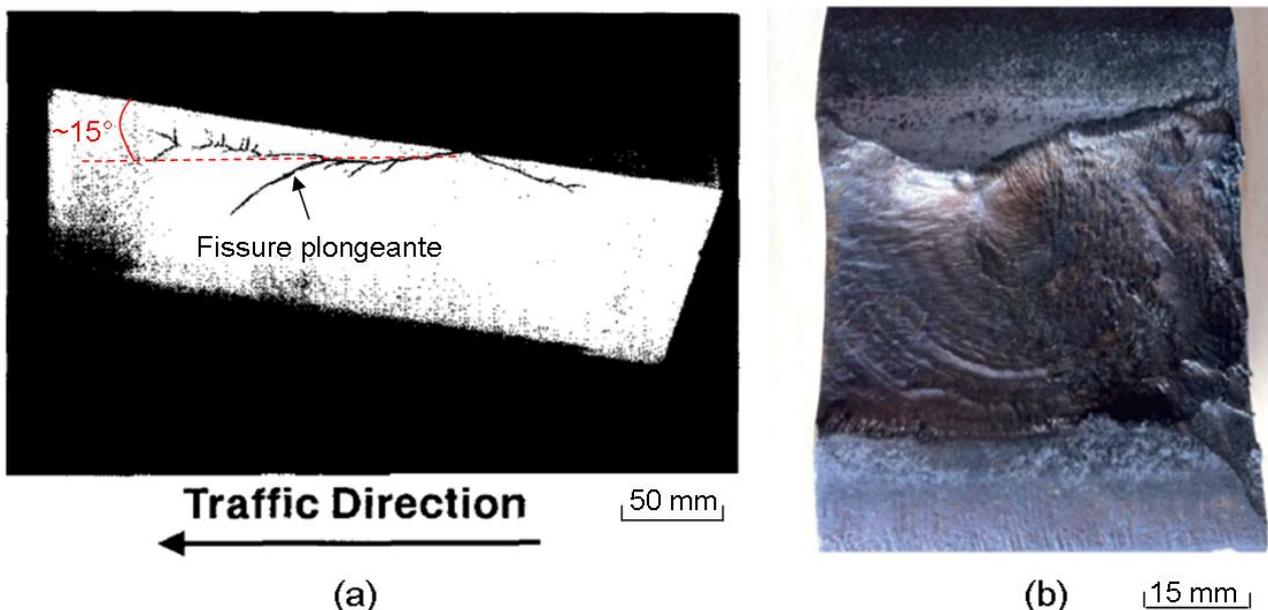
Figure I.3-10 : (a) Description surfacique d'un squat développé
(b) Développement du squat en colonie

En 2009 sur le réseau RATP, pour la première fois, une opération de remplacement de 7 km de rails affectés par des squats de formes développées a été mise en œuvre. Le recensement des zones concernées [RAT 10] révèle que la totalité était en alignement dans des zones de traction ou de freinage. Elles sont également localisées en extérieur, c'est-à-dire en dehors du tunnel situé sous l'agglomération parisienne, qui implique à la fois une variation physico-chimique (environnement clos) et mécanique (plateforme ferroviaire en béton, circulations à vitesses plus faibles).

L'état de l'art des études concernant le défaut de squat montre que la majorité des travaux se sont principalement intéressés à la propagation de la fissure et plus rarement à son initiation. Afin de mieux comprendre l'état des connaissances sur les différentes étapes dans la vie d'un squat, ces études seront détaillées dans les parties suivantes.

I.3.2.2 Études concernant la propagation

Mentionnés dans la littérature à partir des années 1950, les squats ont d'abord été détectés sur le réseau ferroviaire japonais [NAK 65, CLA 96], avant d'apparaître et d'être classés officiellement comme « squat » dans les années 1970 en Europe [DER 93, CLA 96]. Rapidement les auteurs se sont intéressés à quantifier la dangerosité du défaut en étudiant la propagation de la fissure. Les premières études de Clayton [CLA 83] et Bold [BOL 91] pour le réseau de chemin de fer britannique montrent que la croissance du défaut a lieu en deux temps après son initiation surfacique. La fissure, guidée par le cisaillement, plonge dans le rail en formant un angle faible (environ 15°) avec la surface jusqu'à une profondeur comprise entre 25mm et 50mm, avant d'éventuellement dévier et de se propager vers le patin (**Fissure I.3-11(a)**). Les mêmes étapes de propagation ont été constatées par Cannon [CAN 96] dans le cadre d'un projet de recherche européen, initié en 1987 suite au développement des problèmes liés la fatigue de contact. De récents travaux australiens [PAL 13] de fracturation de rails affectés par des squats permettent de mieux appréhender la propagation 3D du défaut. Ces travaux sont en accord avec ceux menés dans le présent travail de thèse (voir II.1.1) [SIM 13].



Fissure I.3-11 : Réseau de fissures d'un squat développé (a) Coupe longitudinale [CAN 96], (b) Ouverture du squat après exposition à de l'azote liquide [PAL 13]

Ces travaux ont permis d'établir les grandes lignes de la relation entre l'aspect de surface du squat et la profondeur de la profondeur et de définir le classement de dangerosité utilisé par l'UIC (**Figure I.3-12**).

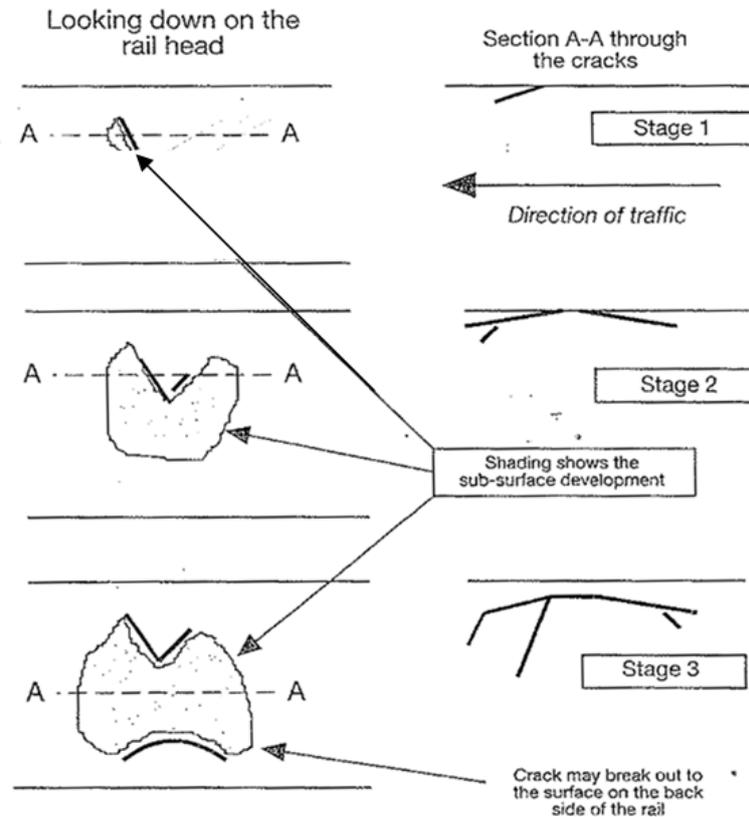


Figure I.3-12 : Développement normalisé du squat [UIC 02]

Plus récemment, de nombreux travaux se sont concentrés sur l'étude du développement de cette fissure de squat par des modélisations par éléments finis [RIN 05, BAI 13, TRO 13]. En particulier, Bogdanski [BOG 96, BOG 02] effectue une étude paramétrique de l'influence de différents paramètres géométriques et mécaniques de la fissure (angle par rapport à la surface, longueur, coefficient de frottement entre les lèvres de la fissure...) sur les facteurs d'intensité de contraintes au niveau de la fissure. Il modélise le squat comme un plan semi-elliptique et met en évidence un mode mixte de propagation de la fissure, mettant à la fois en jeu le cisaillement et la traction des lèvres de la fissure. L'importance du mécanisme de mise sous pression d'un liquide piégé au sein de la fissure est également soulignée [BOG 05a, BOG 05b] et pourrait être liée avec l'absence de squats en tunnel, exceptée sous infiltration.

Enfin, une étude des squats sur le réseau ferré néerlandais, réalisée par Li [LI 08a, LI 08b, LI 09], s'est concentrée sur la propagation surfacique du défaut et cherche à lier les différents stades de développement établis. À partir de modèles par éléments finis dans lesquels une géométrie de squat peu développée est introduite, il montre qu'une sur-contrainte dynamique quasi-périodique de l'effort normal est générée du fait de cette irrégularité de surface. À partir de mesures réalisées sur la morphologie des squats, Li établit que l'accumulation plastique résultant de cette interaction géométrie/effort tend à faire évoluer un squat vers un stade de développement plus avancé et à créer des amorces pour d'autres défauts. Le squat semble s'auto-entretenir et se multiplier en cascade à partir de lui-même.

I.3.2.3 Etudes concernant l'amorçage

Si la caractérisation des squats au dessus de 20mm est normée et que les mécanismes de propagations de la fissure semblent connus, les études concernant l'amorçage du premier squat sont rares et son processus d'amorçage demeure mal compris.

Pourtant dès les premiers signalements de squat sur les réseaux japonais, les études [NAK 65, DER 93] concluent à un amorçage de fissure surfacique résultant de l'accumulation de déformations plastiques au sein de la perlite. En 1982, Clayton et Allery [CLA 82] présentent les résultats du programme de recherche britannique et leurs conclusions sont similaires. Les coupes cristallographiques effectuées confirment les mesures de dureté et laissent apparaître un maximum de déformation due au cisaillement en surface du matériau. Plus récemment, d'autres études [CAR 07, GAR 08, GAR 09] ont confirmé que les déformations et l'orientation privilégiée de la microstructure jouaient un rôle majeur dans l'initiation des fissures par fatigue de contact. À la fin des années 1990, Dang Van [DAN 02, DAN 08] calcule l'état de contraintes dans un rail soumis à un chargement répété. Dans le cas de conditions de contact similaires à celles des zones de squats, il établit que le niveau de fatigue du matériau est le plus fort au centre de la bande de roulement du rail. Cependant l'identification du point d'amorçage de la fissure dans ses premiers instants de propagation fluctue d'une étude à l'autre. Parfois identifié au centre de la bande de roulement [STE 13], le lieu de naissance de la fissure est localisé vers les jours du rail dans d'autres études [CLA 82]. La caractérisation de la localisation et de la morphologie de la fissure initiale n'est donc pas clairement établie.

Progressivement plusieurs raisons sont proposées pour expliquer cette accumulation de déformations plastiques en surface du rail. Notamment, le rôle des forces de traction sur l'état microstructural du champignon de rail est pointé du doigt. Kondo [KON 96], Johnson [JOH 89], Ishida [ISH 96] et Busquet [BUS 05] établissent que le cisaillement résultant d'un important effort de traction roue-rail pourrait expliquer l'état de déformation qui initie le squat. Cette cause serait à relier à l'introduction de nouvelles générations de matériel roulant entraînant davantage de contraintes, en termes de charge et d'adhérence sollicitée, vis-à-vis de la voie. Au contraire, Aknin [AKN 96] observe que le squat n'apparaît pas sur les lignes de fret caractérisées par de faibles vitesses, mais de forts niveaux de traction. Il montre par des simulations numériques de dynamique ferroviaire que les déformations résiduelles pourraient être expliquées par le comportement dynamique des véhicules. À partir d'une certaine vitesse avec ou sans traction, la fréquence de lacet du train (voir **IV.3.1**) correspond à l'empâtement de la voiture, permettant ainsi une surcharge dynamique localisée en certains points du rail. Enfin, d'après le catalogue UIC des défauts de voie, le squat est souvent associé à d'autres défauts géométriques. Clayton [CLA 82] et Li [LI 08] conclut alors que l'interaction entre ces discontinuités et le contact de la roue pourrait mener à une accumulation ciblée de déformations plastiques.

Chacune de ces études précédentes s'accorde sur le fait que les conditions de contact dans les zones de squats doivent être suffisamment inhabituelles pour générer une accumulation de déformation plastique. Cependant, l'origine de cette accumulation fait polémique et plusieurs phénomènes sont proposés. Pris séparément, chacun des phénomènes décrits dans le paragraphe précédent peut se manifester en n'importe quel point du réseau et aucun ne permet de justifier à lui-seul l'existence de zone spécifique de développement des squats [RAT 10]. Le mécanisme menant à l'accumulation de déformations plastiques, puis à la fissure initiale du squat est donc encore incompris.

I.3.2.4 Conclusion et démarche de caractérisation de l'amorçage du squat

Ainsi une étude des conditions locales de contact dans les zones de squats semble nécessaire pour déterminer l'ensemble des conditions d'amorçage du défaut. Cependant, les possibilités d'étude à l'échelle du contact roue/rail sont restreintes au vu des limites actuelles, tant numériques qu'expérimentales. Néanmoins, une caractérisation métallurgique du rail a posteriori (**Partie 3.1.2**) permet de déterminer certaines des caractéristiques du contact (localisation, niveau de glissement, direction et intensité de l'effort de cisaillement). L'approche proposée dans ce travail de thèse est donc d'identifier les conditions de contact nécessaires à l'amorçage du squat à partir d'une caractérisation tribologique du rail.

Toutefois, cette méthodologie ne peut être appliquée sur un squat d'une taille développée, la géométrie de celui-ci modifiant fortement les conditions de contact lui ayant donné naissance. Il est donc nécessaire de compléter préalablement la caractérisation classique du squat (**Figure I.3-13**) : en identifiant la localisation de la fissure d'un squat de niveau 1 et en clarifiant la morphologie d'un défaut de niveau 0, c'est-à-dire avant fissuration. Il sera alors possible d'étudier la microstructure autour de ce défaut naissant pour en déduire les conditions du mécanisme d'amorçage.

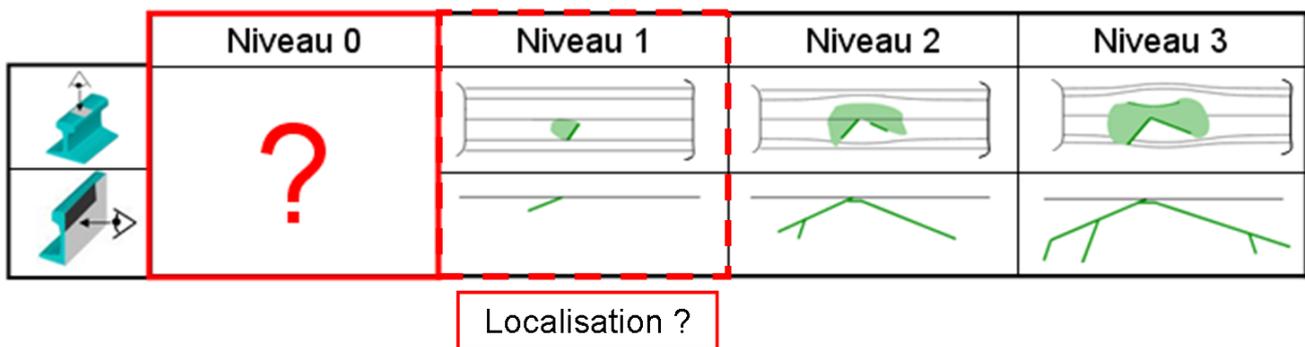


Figure I.3-13 : Caractérisation classique et incomplète du squat (inspiré de [UIC 02]).

Chapitre II : Caractérisation du défaut de squat avant fissuration

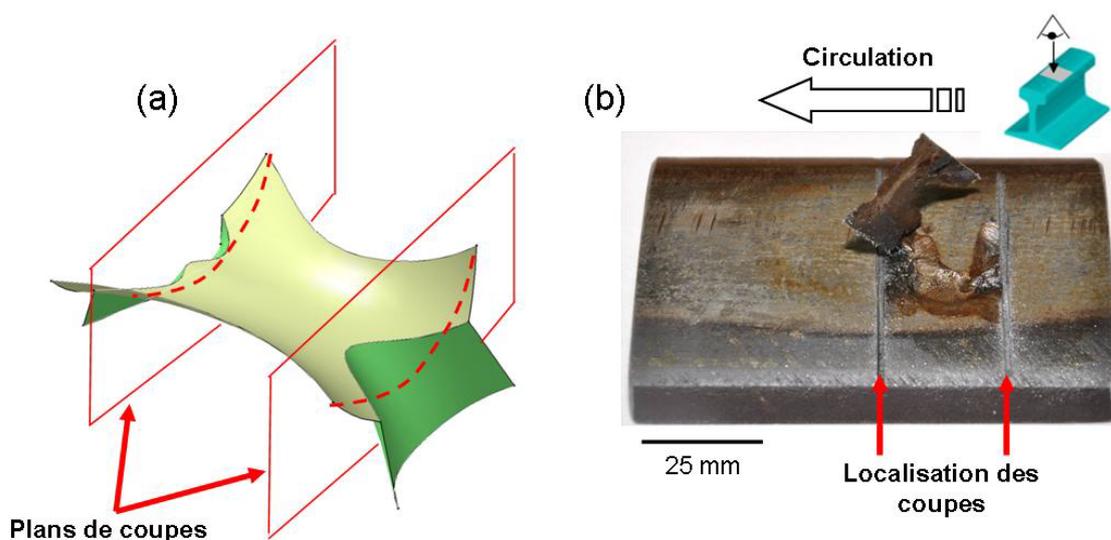
L'objectif de ce chapitre est de compléter la caractérisation classique du défaut de squat. Pour cela, deux études sont effectuées pour progressivement remonter dans la chronologie d'évolution d'un squat. La première partie concerne les observations du front de fissures d'un squat développé afin de localiser et de caractériser la morphologie de la fissure naissante sur la zone d'essais de Bussy-St-Georges. La seconde partie porte sur l'étude de la microstructure du rail autour d'une telle fissure naissante. Cette microstructure particulière constitue le stade de développement 0.

II.1 Identification de la fissure naissante du squat

Pour pouvoir observer la surface du front de fissure principal et localiser son point d'amorçage par fractographie [POK 02], un squat a été ouvert et sa partie supérieure a été retirée.

II.1.1 Procédé d'ouverture du squat

Un essai préliminaire (voir Annexe B) consistant à fraiser millimètre par millimètre la surface d'un échantillon de rail touché par un potentiel défaut de squat a permis de révéler la forme générale du réseau de fissures sous la surface. Cette forme 3D en selle en cheval (**Figure II.1-1(a)**) correspond à celle établie en parallèle dans la bibliographie [PAL 13] et au développement 2D du réseau de fissures d'un squat prévu par l'UIC [UIC 02]. Cette morphologie générale confirme donc la nature du défaut. De plus, grâce à cette visualisation 3D, il apparaît que deux coupes reliant les extrémités des fissures en V sur quelques millimètres de profondeur sont suffisantes pour extraire la partie supérieure du squat (**Figure II.1-1(b)**). Il est alors possible d'inspecter visuellement et au microscope optique, l'état de surface des fronts de fissures pour en déduire le lieu d'amorçage.



II.1.2 Résultats

Après ouverture du squat, on dispose de deux surfaces à observer : le champignon du rail supportant le fond de la fissure et la partie supérieure extraite présentant le dessus de la fissure. Ces deux surfaces portent les stigmates de la propagation du front de fissure, l'étude de leurs faciès permet de retrouver les trois étapes de la propagation normalisée par l'UIC. Une telle interprétation des faciès de rupture est proposée classiquement en fractographie [POK 02, RIC 05, RIC 08].

Chronologiquement, le premier état de surface est observé près de la joue non-active (Surface 1 délimitée en bleu dans les **Figure II.1-2(a)** et **Figure II.1-2(b)**). Cette surface est recouverte de cercles concentriques réguliers et d'apparences assez lisses. Cette apparence est due à la disparition progressive des stries due au frottement entre les lèvres de la fissure. Comme le calcule Johnson [JOH 89] et Busquet [BUS 05], cette zone en extrême surface est soumise à des efforts élevés de cisaillement. Le centre de ces cercles localise précisément le lieu d'initiation de la fissure et indique qu'elle prend place à la frontière de la bande de roulement dans le cas de notre zone d'étude. Le lieu d'initiation de la fissure a donc bien lieu en surface sous l'effet de forts cisaillements de la matière.

Le second état de surface (délimité en jaune dans les **Figure II.1-2(a)** et **Figure II.1-2(c)**) est borné par les deux fissures en V et est localisé entre 0 et 3mm sous la surface. Cette surface a une rugosité un peu plus élevée que la première et est parsemée de stries sous forme d'arcs de cercle. Ces stries semblent être dans la continuité des cercles concentriques précédents et soulignent une propagation graduelle du front de fissure. D'après [JOH 85], les principaux facteurs d'influence à cette profondeur sont les efforts longitudinaux et transversaux. Cette épaisseur du matériau est également soumise à de fortes contraintes résiduelles de compression influençant la propagation [CLA 87]. Des résultats similaires peuvent être trouvés dans d'autres études aussi bien expérimentales que numériques [PAL 12, BOG 02]. Ainsi, cet exemple illustre que si l'amorçage de la fissure est conditionné par la microstructure, très rapidement la propagation semble principalement pilotée par les conditions de contact et les contraintes résiduelles [GAR 09].

La propagation des stries en arc de cercle se poursuit dans les 3 directions en suivant la forme en selle de cheval (**Figure 10**), cependant aux alentours de 3mm de profondeur, un troisième état de surface apparaît (délimité en vert dans les **Figure II.1-2(a)** et **Figure II.1-2(d)**). Contrairement aux deux précédentes, cette surface ne laisse pas apparaître de motif régulier en surface. Elle présente une rugosité élevée avec une topologie composée de creux et de bosses et plonge promptement dans le rail avec un angle important par rapport à la surface. Ce changement brutal de propagation à 3 mm sous la surface correspond à une domination du champ de contrainte par l'effort normal [JOH 85]. Ces conclusions sont à rapprocher des études qui supposent une propagation du squat par ouverture de la fissure ou mise sous pression d'un fluide piégé dans la cavité [WON 96, BOG 02].

En conclusion, l'étude de l'état de surface du fond de fissure permet de confirmer que le squat est un défaut de fatigue et de consolider l'historique de propagation en trois niveaux proposé par l'UIC. En effet, la variation des modes de propagation est à mettre en parallèle avec celle des conditions de contact due à l'évolution de la géométrie de surface au cours de la vie du squat. Plus important dans le cadre de ce travail, cette étude permet également de dresser le portrait de la fissure naissante autour de laquelle l'étude de la microstructure pourrait se révéler intéressante. Dans la zone d'étude de Bussy-St-Georges, une fissure naissante de squat

doit donc être recherchée sous la forme d'une fissure s'initiant en surface, décentrée côté joue non active de la bande de roulement et transversale à la direction de circulation car initiée par des efforts de cisaillement d'après la morphologie de la surface 1. Notre cas semble donc similaire à celui rencontré par Clayton au cours de ces travaux (**Figure II.1-3**).

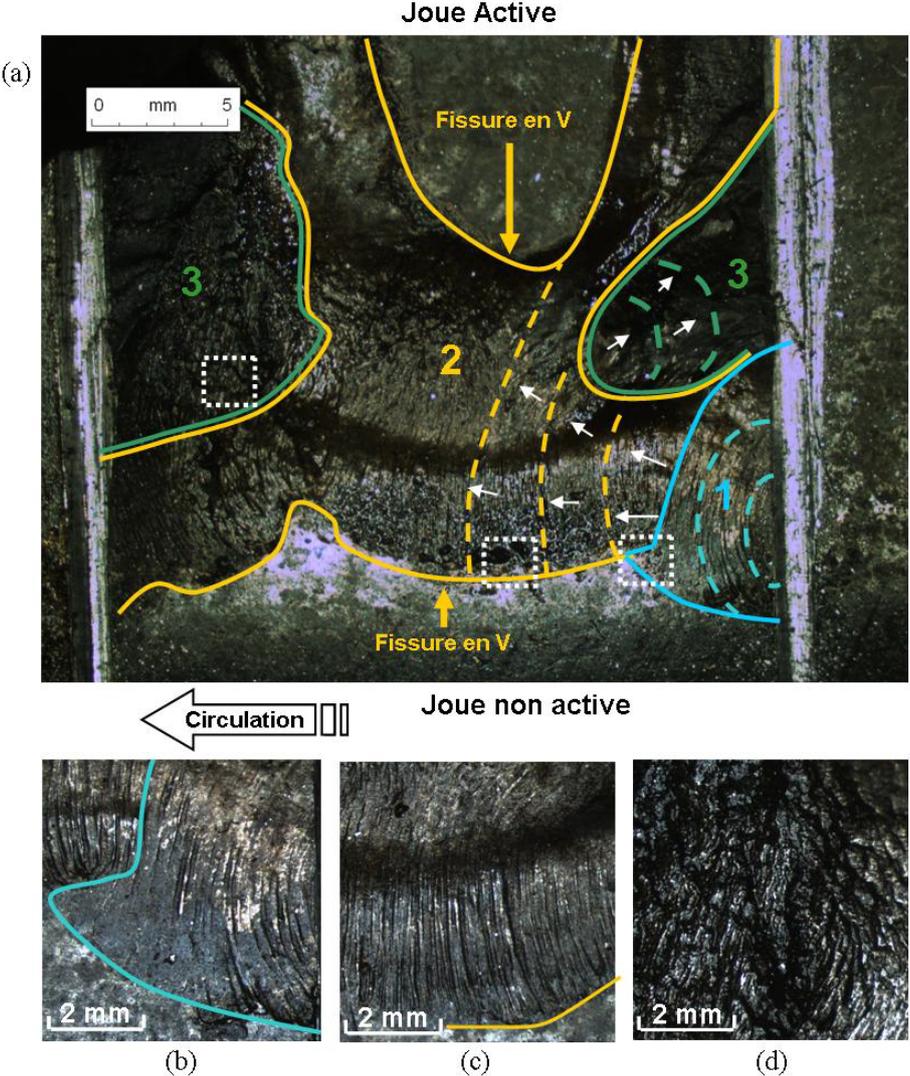


Figure II.1-2 : Etat de surface du fond de fissure (a) Vue générale, (b)-(d) Vues détaillées respectives des surfaces 1 à 3

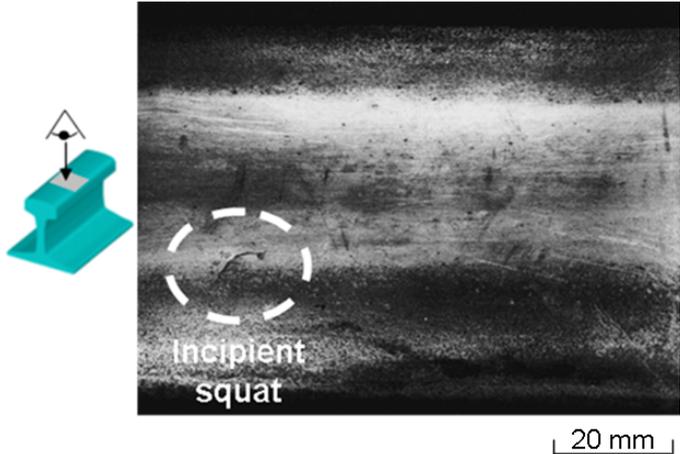


Figure II.1-3 : Fissure naissante de squat identifiée par Clayton [CLA 82]

II.2 Vers la caractérisation d'un squat avant fissuration

Contrairement aux formes développées de squats, pour lesquelles les conditions de contact et la microstructure sont très éloignées des conditions initiales, l'étude de la microstructure autour d'un squat naissant permet d'éviter l'influence de sa géométrie.

II.2.1 Détails expérimentaux

À partir de la description précédente, plusieurs fissures peu développées ont été repérées lors de visite sur un site affecté de squats sur la voie 2 de la ligne A du RER et dont les caractéristiques sont données dans le **Tableau II.2-1**. Les échantillons de rail ont ainsi été coupés précautionneusement sur site et immédiatement confinés dans des contenants hydrophobiques afin de protéger au mieux leur surface des contaminations et de l'oxydation.

Données Voie	Profil de rail	60E1
	Nuance d'acier	R260
	Géométrie de la voie	Alignement
	Type de pose	Ballast
	Traverses	Bi-blocs
	Dernier meulage	2006
	Date de pose	2006
Données Véhicule	Type de train	MI2N / MI84
	Charge à l'essieu (T)	18 / 14
Conditions de circulation	Vitesse (km/h)	80-90
	Type de conduite	Voie 1 : Accélération Voie 2 : Freinage
	Chargement quotidien (T)	60 000

Tableau II.2-1 : Descriptif des zones d'essais

Remarque : L'ensemble des essais de validation des chapitres IV et V ont été effectués sur la même zone d'essai, mais sur la voie de circulation opposée (**Figure II.2-1**).

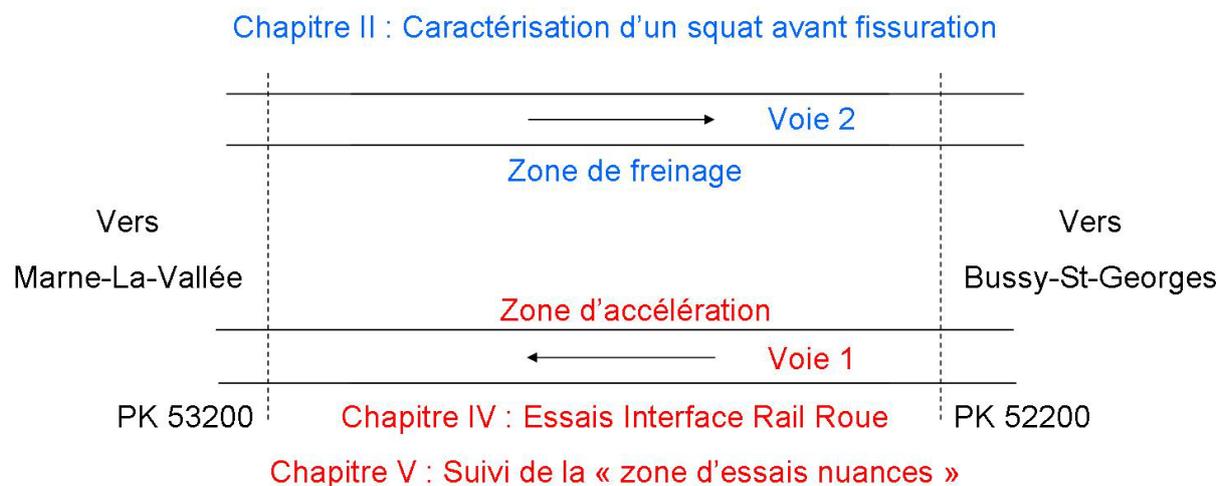


Figure II.2-1 : Localisation des différentes zones d'essais

Après une inspection visuelle minutieuse et la réalisation d'une topographie au microscope électronique à balayage, le défaut présentant la géométrie la moins perturbée par l'amorce de fissure a été sélectionné (**Figure II.2-2**) pour caractériser la microstructure autour de cette fissure. La surface de la bande de roulement de cet échantillon a ainsi été observée par microscopie optique et électronique à balayage. Plusieurs coupes longitudinales et transversales ont également été réalisées (**Figure II.2-2**), polies et attaquées avec une solution de Nital 4% (solution d'acide Nitrique et Éthanol) pendant plusieurs secondes pour révéler la microstructure : elle permet de dissoudre les lamelles de ferrite, laissant seules apparentes les lamelles de cémentite. Les déformations de ces dernières sont finalement utilisées comme indicateurs de l'ampleur et de l'orientation des sollicitations mécaniques locales auxquelles est soumis le matériau (Voir **I.3.1.2**).

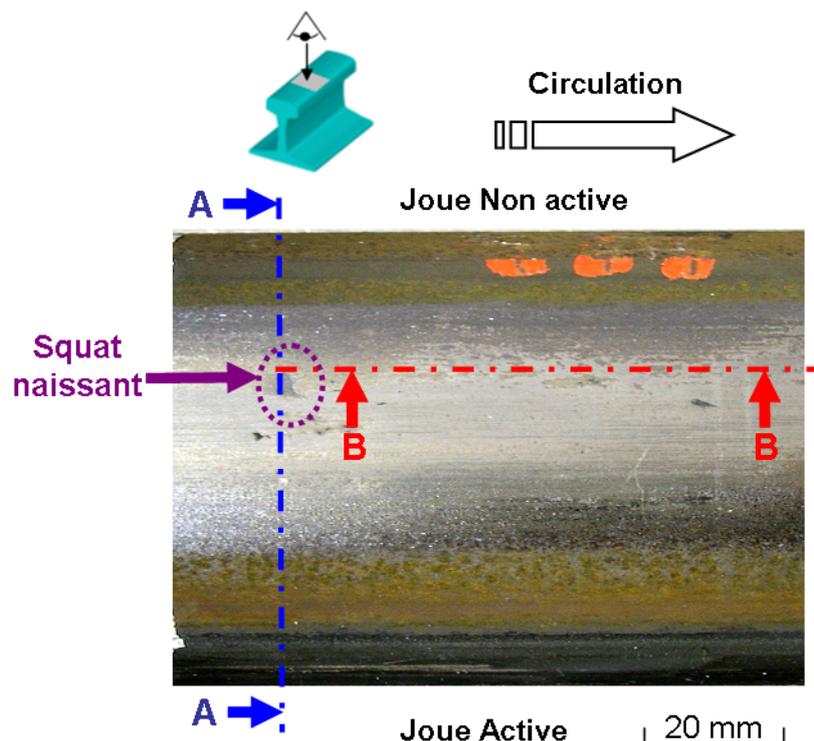


Figure II.2-2 : Localisation des coupes à proximité de la fissure naissante

II.2.2 Description de la bande de roulement

II.2.2.1 Aspect général de la bande de roulement

Les observations initiales de la surface de l'échantillon sélectionné montrent que la majorité de la bande de roulement exhibe en surface des transformations tribologiques superficielles (TTS) [ELE 99] sous la forme de phase blanche, une transformation de phase solide/solide de l'acier [NEW 84, OST 01, ANT 10]. Cette phase blanche est visuellement plus brillante, présente une résistance accrue à l'attaque au Nital et une dureté plus élevée. L'acier présente alors dans ces zones des caractéristiques différentes de la nuance perlitique R260 constituant le rail. Ainsi, des mesures de macro-dureté réalisées par un duromètre portatif montrent une dureté moyenne de 450 Hv pour la partie transformée contre 300 Hv sur le reste de la bande de roulement. De plus amples détails sur la nature et le mécanisme de formation de la phase blanche seront donnés dans le chapitre suivant (**III.1**).

De plus, les observations au microscope optique à balayage révèlent que la microstructure des couches superficielles présente des caractéristiques qui varient en fonction de la position transversale sur le profil. Plus précisément, la bande de roulement est divisée en cinq motifs identifiés comme des bandes longitudinales (**Figure II.2-3**) qui présentent chacune une microstructure spécifique et homogène dans la direction de circulation, excepté pour la bande II où deux motifs prennent place périodiquement. Pour la clarté de la rédaction, seule la description des bandes II-1, II-2 et III est dressée dans cette partie. Une description détaillée de chacune de ces bandes peut être trouvée dans l'Annexe C.

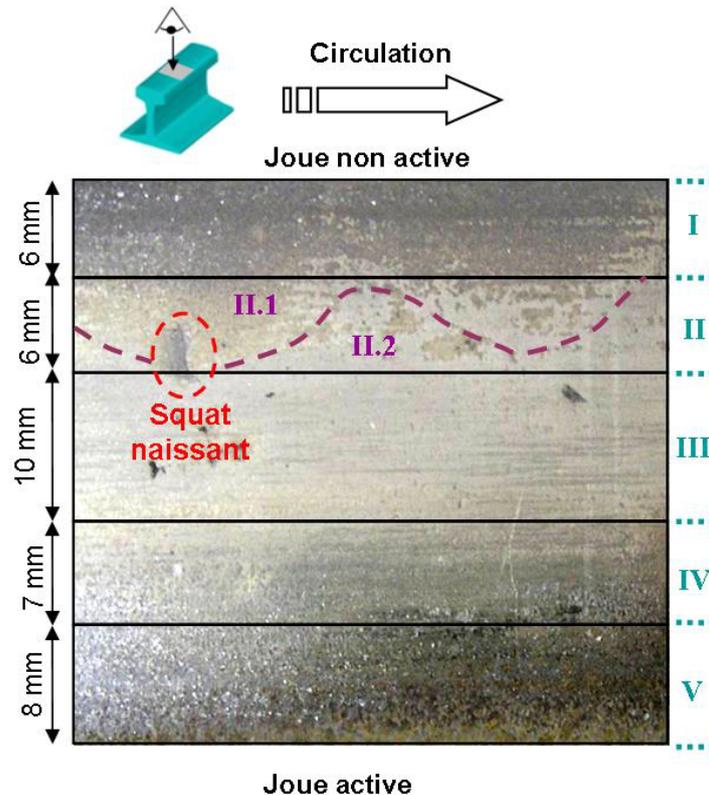


Figure II.2-3 : Répartition par bandes longitudinales de la bande de roulement

II.2.2.2 Description des bandes II-1, II-2 et III

- Aspect de surface :

La bande II-1 est relativement éloignée du centre de la bande de roulement, par conséquent les roues ne viennent en contact dans cette zone que pour des valeurs élevées du déplacement transversal de l'essieu. En alignement, ce qui est le cas dans cette zone, les contacts doivent donc y être assez peu fréquents. Une couche d'oxyde discontinue est observable et laisse donc apparaître le matériau de base à certains endroits (**Figure II.2-4(1)(b)**).

À l'œil nu, l'aspect de surface de la bande II-2 semble moins rugueux, plus brillant et plus homogène que sur la bande précédente. Vue en détail, au microscope électronique à balayage (**Figure II.2-4(1)(c)**), la surface apparaît en réalité comme une mosaïque d'ilots de phases blanches de dimensions caractéristiques $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$. Certains de ces ilots s'écaillent (en partie ou en totalité) et laissent place à des zones fortement oxydées.

La surface de la bande III exhibe également une couche de phase blanche, mais sous la forme de bandes transversales d'une largeur comprise entre 0.5 et 1mm (**Figure II.2-4(2)**). Quelques rares zones d'arrachement sont également observables, mais l'ensemble a une apparence très brillante et homogène à l'œil nu.

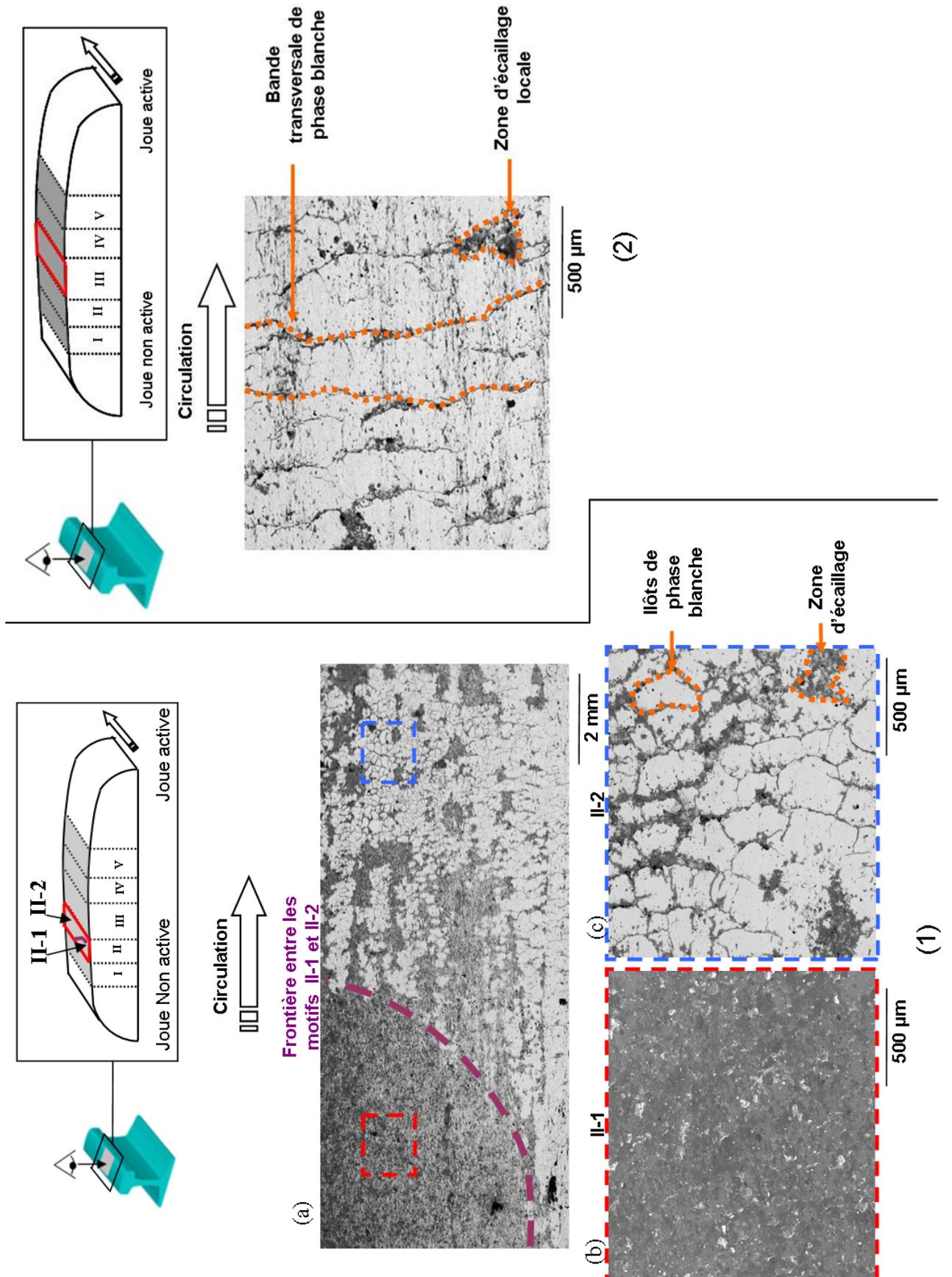
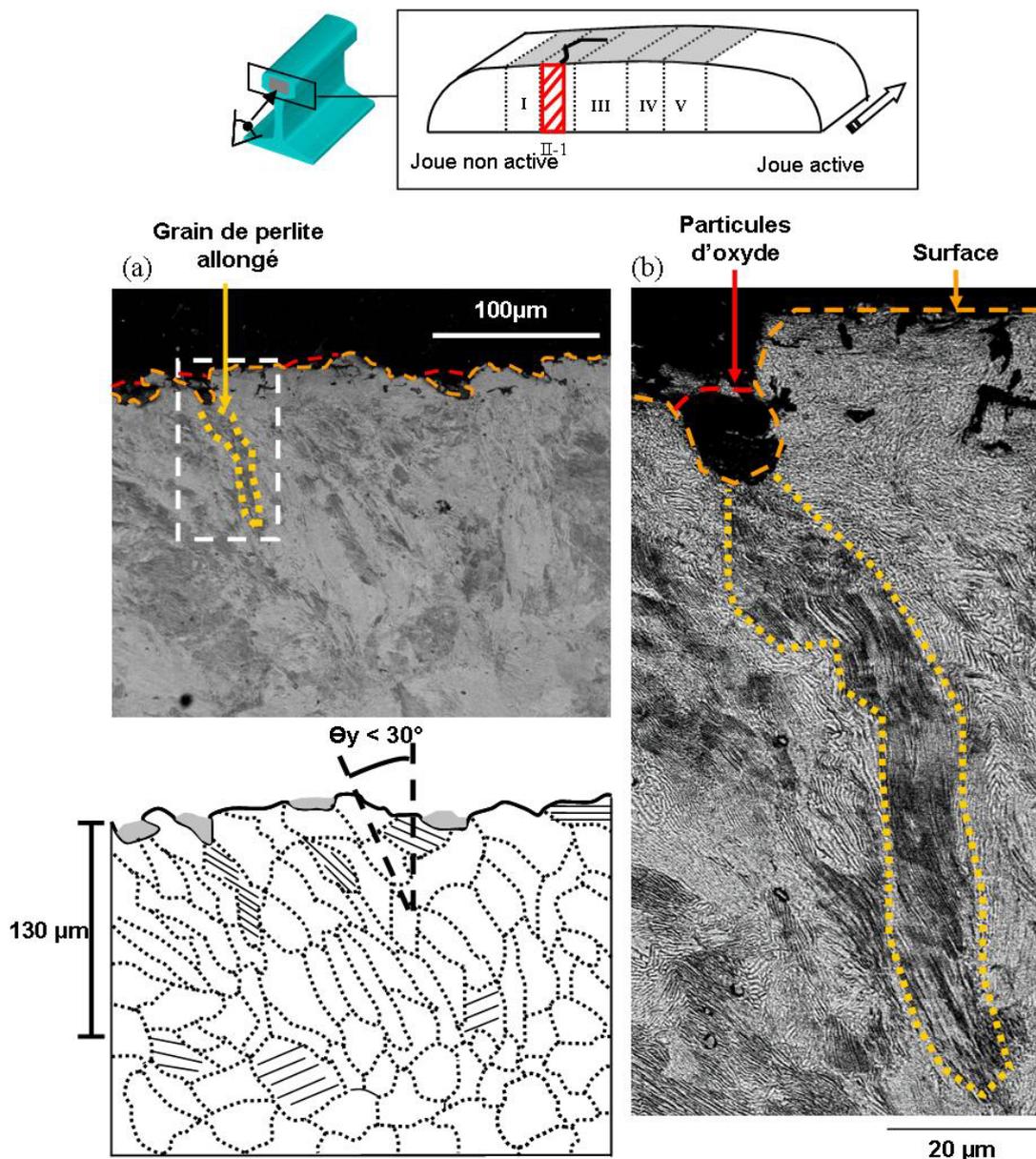


Figure II.2-4 : Morphologie de surface de la bande de roulement - (1) Bande II, (2) Bande III

- Aspect de la microstructure sous la surface :

- Bande II-1 :

L'état peu déformé de la microstructure sous la surface visible sur les coupes transversales (**Figure II.2-6**) et longitudinales (**Figure II.2-5**) confirme que les contacts sont assez peu intenses dans cette zone. Ils sont cependant suffisants pour déformer légèrement les grains de perlite proche de la surface avec un angle de cisaillement θ_y limité (résultant de la déformation plastique résiduelle), de l'ordre de 30° par rapport à la surface. Cette déformation prend place dans les deux directions, avec une composante transversale orientée vers la joue non active et une composante longitudinale parallèle au sens de circulation. Les vues de coupes permettent également d'estimer visuellement que la couche de perlite déformée atteint une profondeur maximale de $130\mu\text{m}$ (**Figure II.2-5**).



θ_y : Angle de cisaillement maximal dans la direction transversale

Figure II.2-5 : Coupe transversale de la bande II-1 (a) Vue générale, (b) Grain de perlite déformé proche de la surface

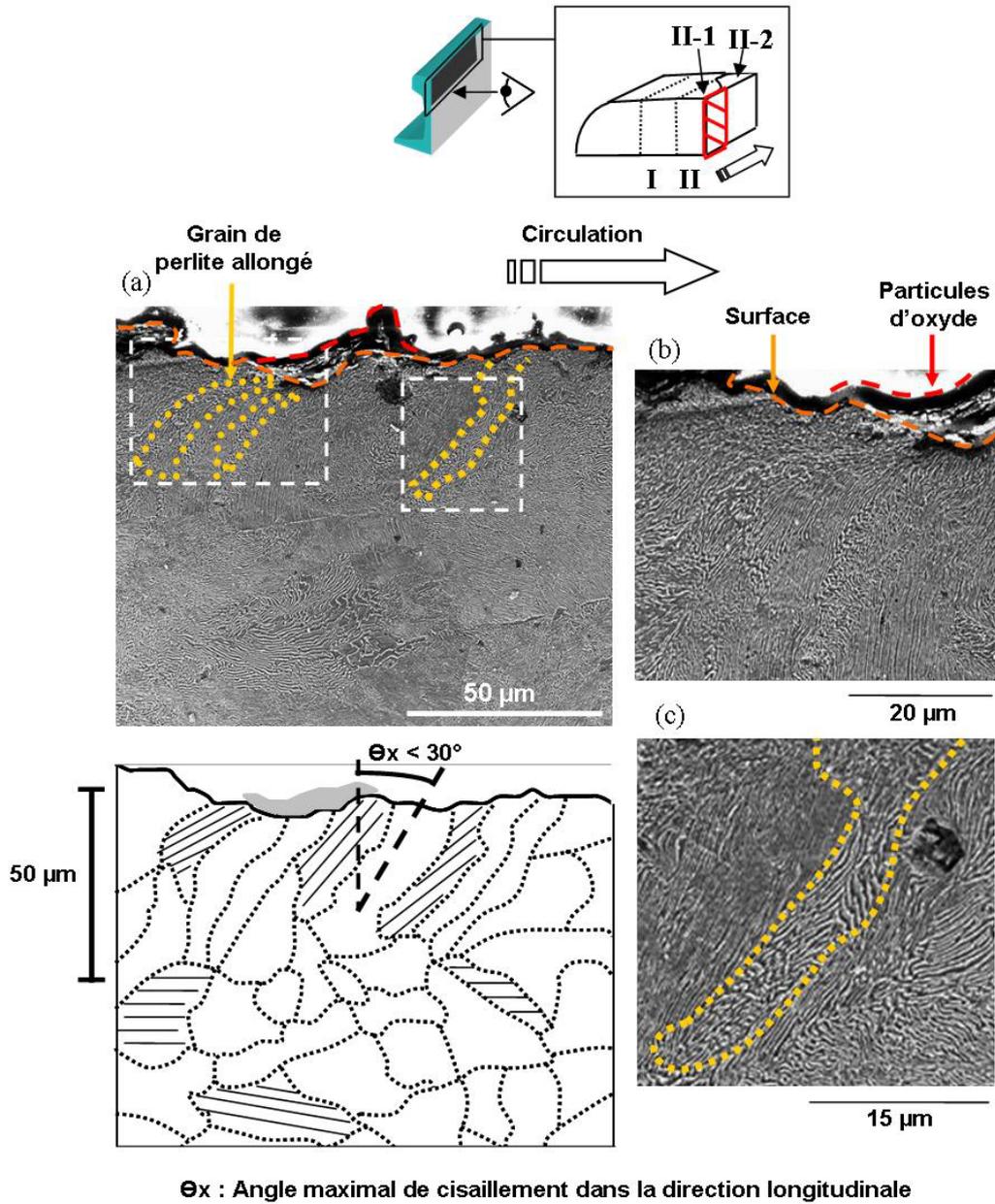
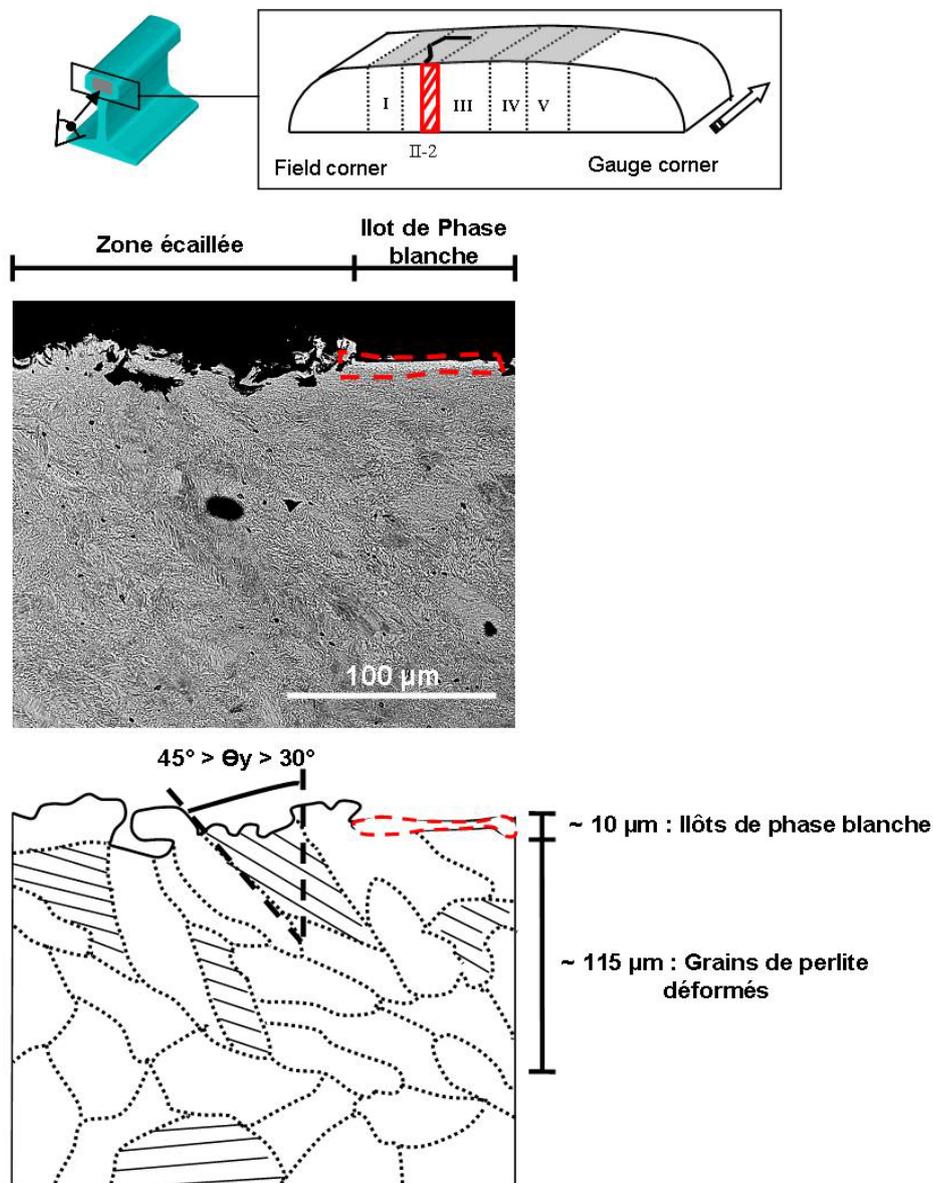


Figure II.2-6 : Coupe longitudinale de la bande II-1 (a) Vue générale, (b) Zoom sur la surface, (c) Grain de perlite déformé proche de la surface

○ Bande II-2 :

De manière similaire à la bande II-1, la coupe transversale met en lumière une déformation plastique transversale des grains de perlite orientée en direction de la joue non active (**Figure II.2-7**) au niveau de la bande II-2. Cette orientation est caractérisée par un angle de cisaillement supérieur à 30° . Par contre, l'orientation de la déformation longitudinale (**Figure II.2-8**) est l'inverse de celle attendue pour une zone de freinage (voir **IV.3.4.2** pour plus de détails). Une intense déformation ($\theta_x > 70^\circ$) dans la direction opposée au sens de circulation (et donc à l'orientation plastique de la bande II-1) est ainsi observée jusqu'à une profondeur de $20\ \mu\text{m}$ sous des îlots de phases blanches d'une épaisseur de $15\ \mu\text{m}$. Dans cette zone, les grains de perlite ne sont plus discernables, les lamelles de cémentite s'orientent parallèlement à la surface et la distance moyenne entre-elles diminue. Cette déformation longitudinale n'apparaît pas tout le long de l'échantillon, mais de manière périodique et notamment à proximité de la fissure.



θ_y : Angle de cisaillement maximal dans la direction transversale

Figure II.2-7 : Coupe transversale de la bande II-2

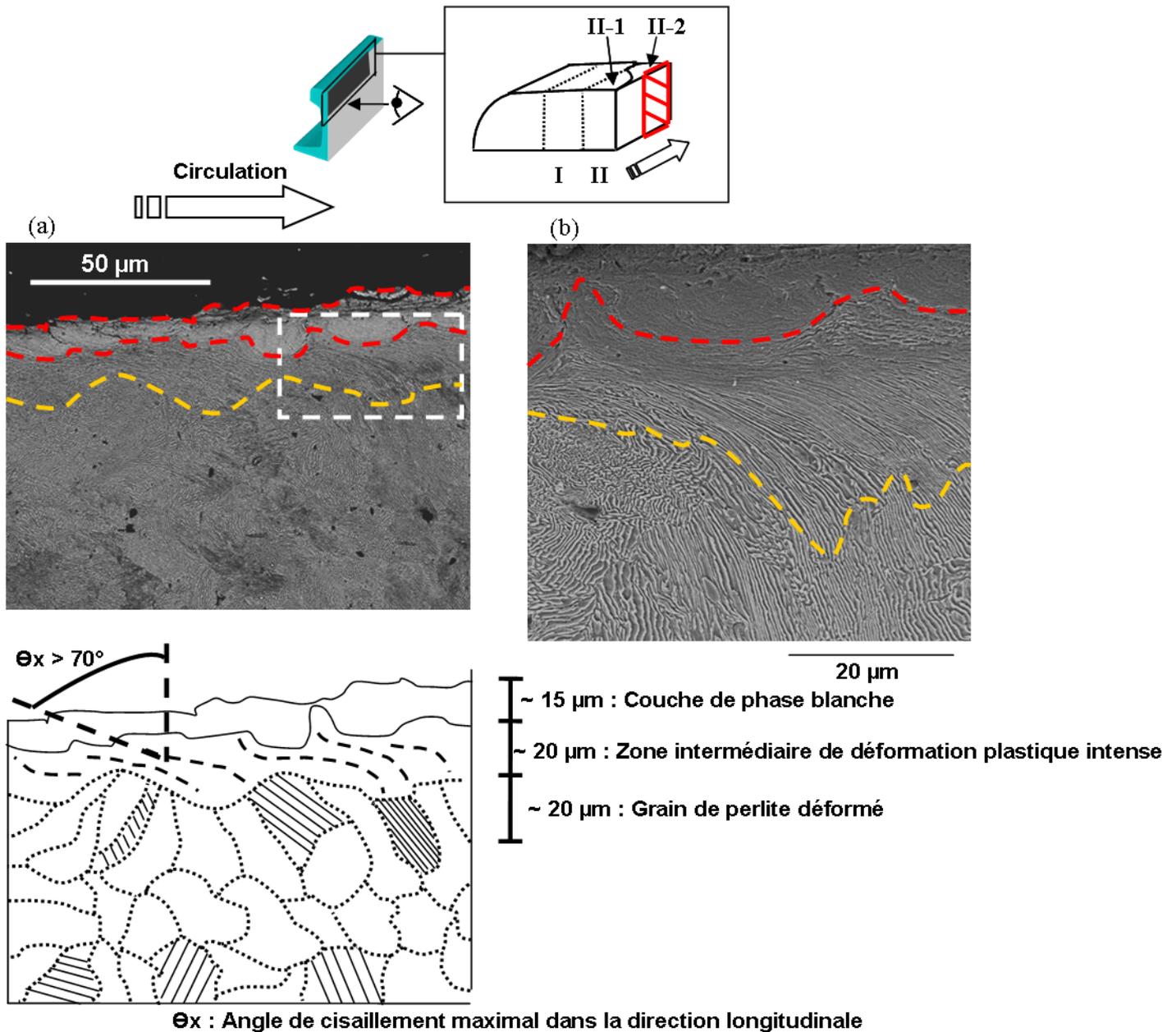


Figure II.2-8 : Coupe longitudinale de la bande II-2 (a) Vue générale, (b) Zoom sur les déformations plastiques proches de la surface

○ Bande III :

La coupe transversale est cohérente avec les observations de surface (**Figure II.2-9**). La phase blanche apparaît avec une épaisseur continue et uniforme de 35 μm . Sous cette phase blanche, la perlite ne présente pas de déformation plastique dans la direction transversale. Cependant, une observation attentive de l'interface entre phase blanche et perlite révèle une dissolution progressive des lamelles de cémentite. La coupe longitudinale de la bande III révèle de sévères déformations dans la direction de roulement.

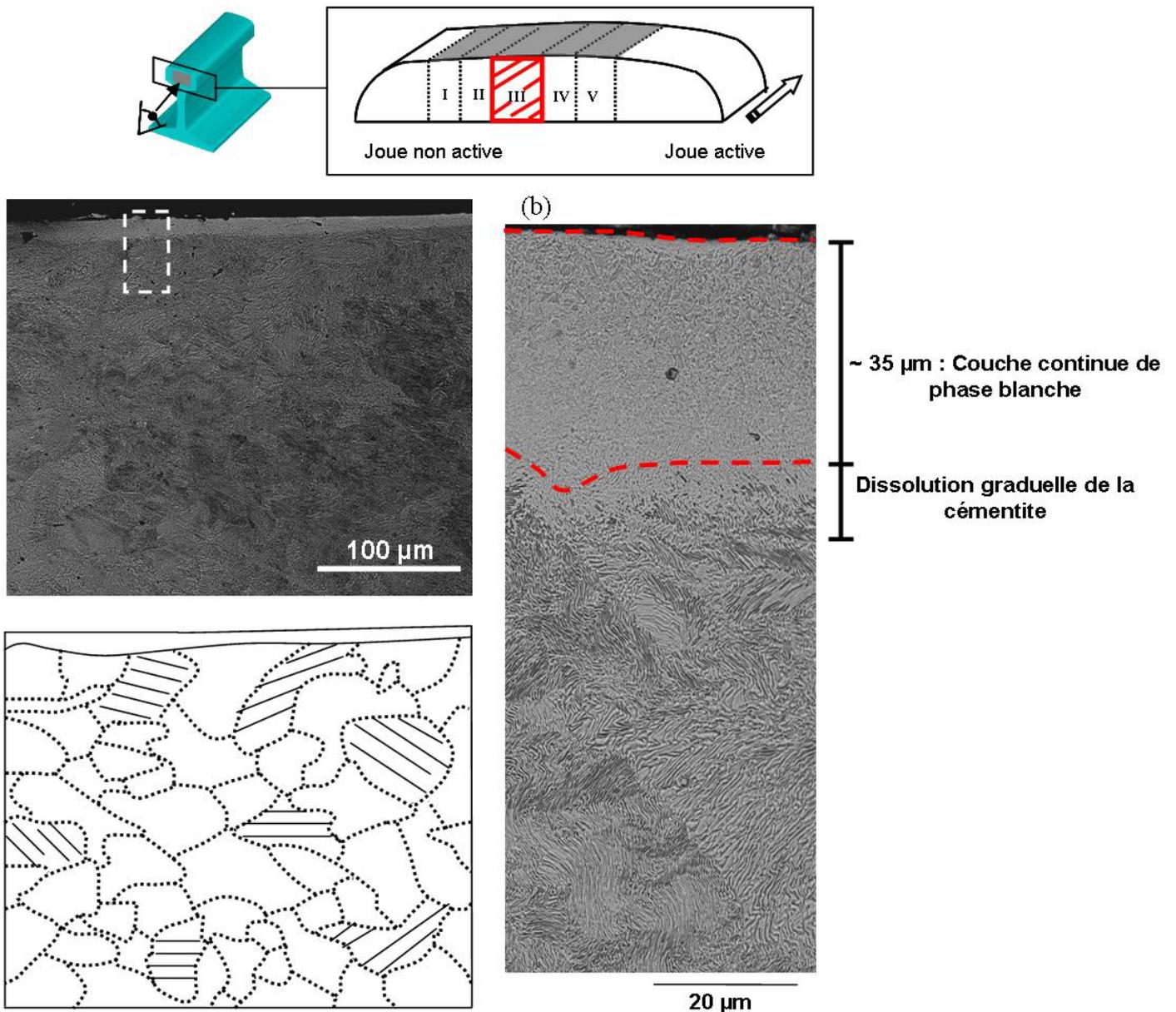


Figure II.2-9 : Coupe transversale de la bande III (a) Vue générale, (b) Vue détaillée proche de la surface

II.2.2.3 Bilan des observations

Pour faciliter la compréhension du faciès de la bande de roulement, un schéma récapitulant la morphologie surfacique de la phase blanche, les orientations de déformations plastiques et la localisation de la fissure est donné en **Figure II.2-10**.

Le point-clé de cette description est que la fissure est située à la frontière des bandes II-1, II-2 et III, au milieu d'un fort gradient de microstructure.

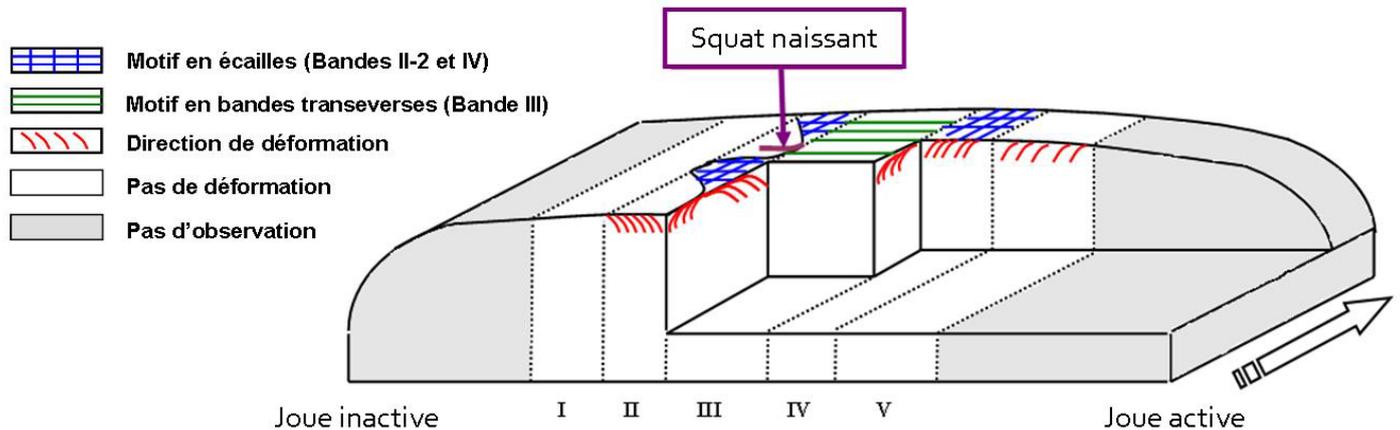


Figure II.2-10 : Organisation de la microstructure dans les couches superficielles de la bande de roulement

Le même type d'observations a également été effectué sur des échantillons provenant d'autres zones de squats. La répartition au sein de la bande de roulement est différente, cependant l'amorce de fissures se trouve également à la frontière entre plusieurs bandes longitudinales de microstructures. Une caractéristique commune d'un niveau 0 de squat avant fissuration émerge.

De plus, la bibliographie récente sur les squats est également marquée par une résurgence des observations de phase blanche à proximité des défauts [PAL 12, STE 13]. L'hypothèse d'une origine des squats par fissuration de la matière à proximité d'un gradient de microstructures ne se cantonne donc pas au seul réseau RATP. Ainsi en avril 2012, sur le réseau néerlandais, Steenbergen [STE 13] conclut à une influence majeure de la phase blanche et de l'anisotropie 3D de la couche superficielle dans l'initiation de la fissure. Ses observations métallurgiques sont d'ailleurs très proches de celles réalisées sur le réseau RATP (**Figure II.2-11**). De même, Pal [PAL 13, DAN 13] constate sur le réseau australien, une phase blanche irrégulière à la surface de la bande de roulement dans les zones de squats et qui disparaît progressivement avec la propagation du défaut (**Figure II.2-12**). Au sein de cette phase blanche aux propriétés mécaniques cassantes, il observe l'amorçage d'un grand nombre de fissures.

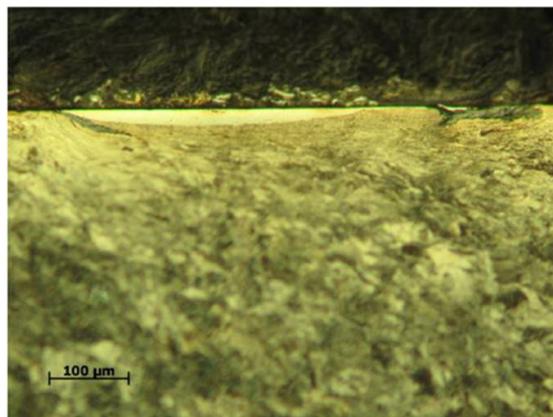


Figure II.2-11 : Initiation de fissure guidée par l'anisotropie de la microstructure [STE 13]

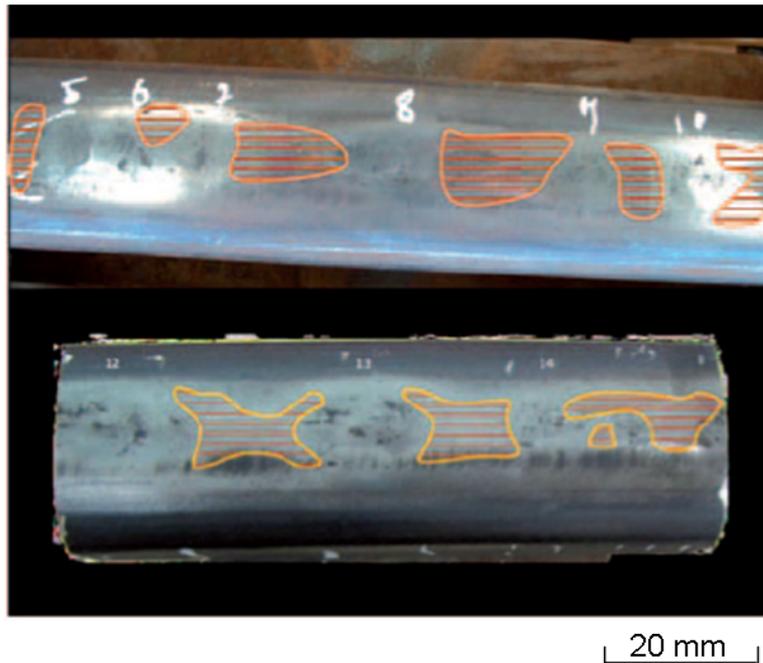


Figure II.2-12 : Localisation de la phase blanche (détectée par courant de Foucault) sur un rail affectée par le squat [DAN 13]

II.2.3 Définition du niveau 0 de développement d'un squat

Les bandes de roulement des zones à squats se divisent en bandes longitudinales caractérisées par une microstructure spécifique à chacune, en termes d'aspect de surface, d'épaisseur de phase blanche et d'orientation de fibrage de la microstructure sous-jacente. La morphologie exacte des bandes varie d'une zone de squats à l'autre, mais la diversité microstructurale se retrouve à chaque fois. La localisation de la fissure à la frontière de ces bandes permet de supposer que la coexistence de ces différentes microstructures est essentielle pour amorcer un squat. On définit ainsi un squat de niveau 0 comme un stade pré-fissurant et caractérisé par cette morphologie de bandes microstructurales pour compléter le schéma de développement classique du squat (Figure II.2-13).

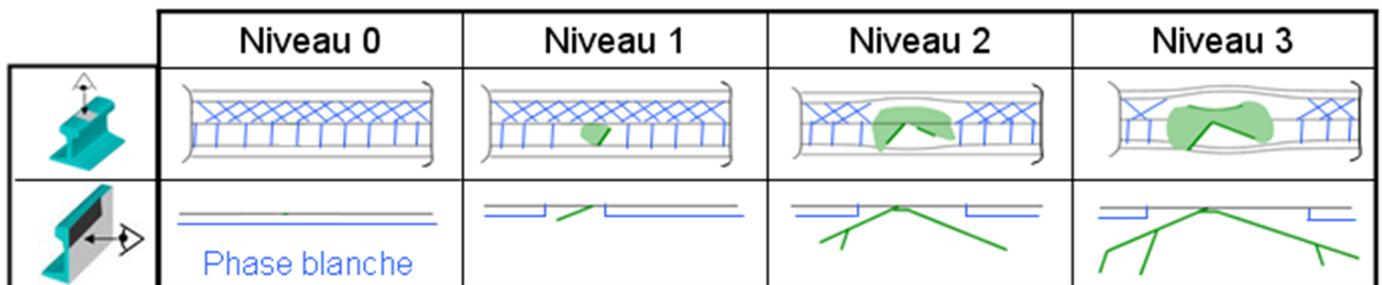


Figure II.2-13 : Caractérisation du squat à ces différents stades de développement

Suite à ces observations, il apparaît que la compréhension du mécanisme de formation du squat revient à clarifier le processus de formation des bandes de microstructures. En particulier, les différentes conditions de contact nécessaires à la formation de la phase blanche ont besoin d'être étudiées pour comprendre lesquelles interviennent dans les zones de squat et participent à la formation du défaut.

Chapitre III : Scénario tribologique d’amorçage du squat

L’identification d’un squat de niveau 0 et la caractérisation de la microstructure associée permettent de déduire une partie des conditions de contact dans les zones affectées par ce défaut. Ces déductions servent alors de base à la proposition d’un scénario multi-échelle d’initialisation du squat, du rail neuf à la fissuration initiale.

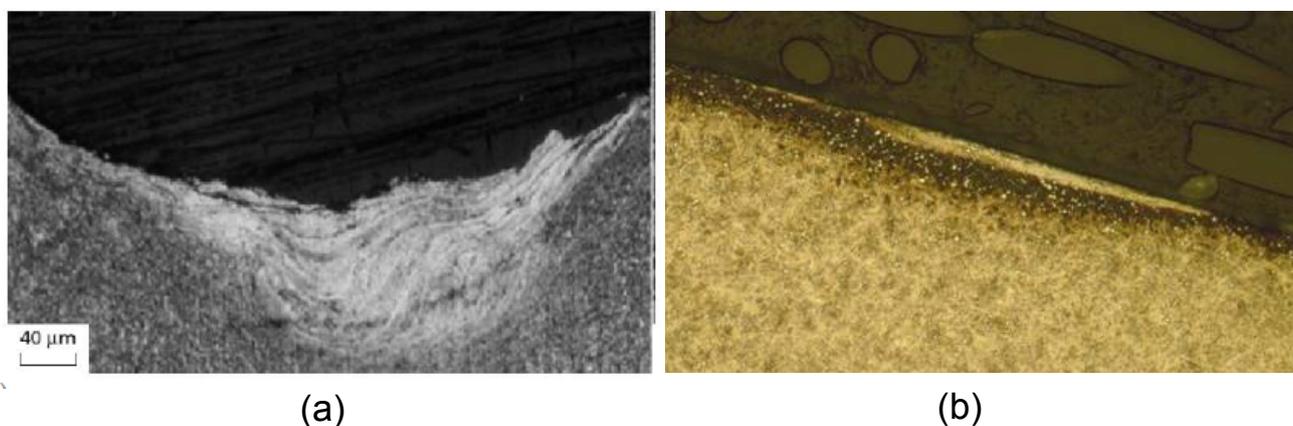
Au vu de l’importance, mentionnée précédemment, des transformations tribologiques de surface (TTS) sous forme de phase blanche dans le cadre de ce scénario, la première partie de ce chapitre expose les différentes études effectuées sur la nature et le mécanisme de formation de cette microstructure. Plus de détails pourront être trouvés dans les travaux suivants [BUL 91, BER 97, CAR 05, ANT 10].

III.1 Natures, propriétés et origines de la phase blanche

III.1.1 Définitions : TTS et Phase blanche

Les Transformations Tribologiques Superficielles (TTS) désignent les transformations de phase solide/solide des couches en extrême surface des corps en contact. Elles s’accompagnent, généralement, de modifications structurales, voire d’une réorganisation cristallographique des matériaux [ANT 10].

De telles transformations ont été observées sur un large éventail de matériaux et dans des cas variés d’applications industrielles où les environnements impliquent de fortes déformations et/ou des élévations importantes de températures au contact. Par exemple, plusieurs formes de TTS ont été trouvées, dès 1912 à la surface de câbles de ponts suspendus [STE 12, TRE 41] ou dans les barilletts d’armes à feu [SNA 39, BOS 91], puis rapidement lors d’opérations de coupe [OKU 78], fraisage [TUR 75], perçage [GRI 85] et meulage [EDA 81, TOM 88] sur machines-outils. D’autres TTS sont également signalées dans des études d’impact de billes d’acier et de titane [SEK 00] (**Figure III.1-1a**) ou dans des cas de fretting étudiés par Blanchard [BLA 91] sur du titane et Sauger [SAU 97] sur du cuivre, ou encore du magnésium [HAJ 05] et du graphite [JAC 96]. Si ces différents cas peuvent sembler être plutôt extrêmes en termes de sollicitations, les TTS apparaissent également dans des applications aux conditions de contact moins agressives, comme dans les bagues de roulements [MET 13 et] (**Figure III.1-1b**) ou les cannelures des boîtes de vitesses d’éoliennes [EVA 12].



**Figure III.1-1 : (a) TTS observée pour un acier faiblement allié soumis à des impacts répétés [SEK 00]
(b) TTS observée à la surface d’une bille de roulement [MET 13]**

Malgré cette grande diversité de cas d'apparition, les travaux [BUL 91] menés sur les aciers ont montré que leurs TTS présentaient des caractéristiques communes. Ainsi, leur composition chimique similaire à l'alliage initial laisse supposer qu'elles ne naissent pas nécessairement d'une contamination extérieure. De plus, d'après le recoupement d'une cinquantaine d'études sur le sujet réalisé par Griffiths [GRI 87], ces transformations possèdent également une dureté plus élevée que le matériau d'origine et une plus grande résistance aux attaques acides (type solution Nital), ce qui leur donne un aspect blanc lors d'observations au microscope.

Du fait de cette couleur, les TTS apparaissant sur les aciers sont connues sous le nom de phase blanche (White Etching Layer en anglais), notamment dans le monde ferroviaire. Leur apparition fréquente à la surface de la bande de roulement a été signalée sur des rails de 1961 par Naumann [NAU 61], et a initié de nombreuses études au cours des dernières années [CLA 96]. Cependant, la composition exacte et les mécanismes de formation de cette réorganisation microstructurale demeurent mal compris.

III.1.2 Caractérisation de la phase blanche

III.1.2.1 Apparence et propriétés mécaniques de la phase blanche

De nombreuses études, notamment les expertises de Clayton sur le réseau britannique [CLA 82, CLA 96] ou celles de Deroche [DER 93] sur les rails français, laissent supposer que la phase blanche est très courante au niveau de la bande de roulement. Son aspect est cependant plus ou moins continu et étalé suivant les observations. Clayton [CLA 82] et Baumann [BAU 96] expliquent cette disparité par une juxtaposition plus ou moins avancée de différentes transformations. Dans un premier temps, les phases blanches se présenteraient sous la forme de fines bandes isolées à la surface du rail (approximativement $10\mu\text{m}$ d'épaisseur pour 30 à $50\mu\text{m}$ de large et $100\mu\text{m}$ de long). Puis, la multiplication de ces bandes crée alors une couche homogène sur la bande de roulement d'une épaisseur maximale de quelques dizaines de micromètres (**Figure III.1-2**).

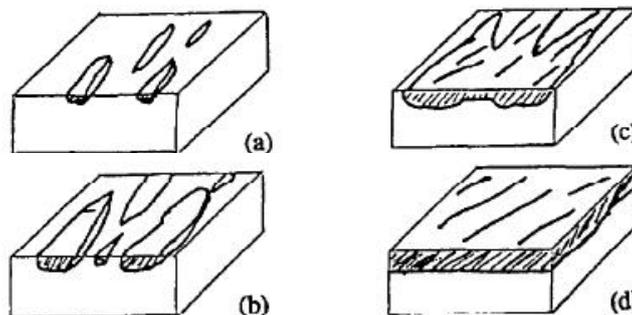


Figure III.1-2 : Processus de formation de la phase blanche proposé par Baumann [BAU 96]

Les faibles dimensions de cette couche de phase blanche rendent difficile la caractérisation macroscopique de ses propriétés mécaniques indépendamment du substrat¹². Les mesures de dureté « macroscopique » réalisées par indentations à la surface du rail montrent une différence de dureté de l'ordre de $100\text{-}150\text{ Hv}$ entre un échantillon composé à la fois de phase blanche et de substrat et d'un échantillon uniquement composé du même substrat.

¹² Le substrat désigne la structure sous la couche de phase blanche, dont la microstructure est celle du matériau d'origine avant transformation.

Cependant, une caractérisation locale de la microstructure a également été effectuée. Des mesures de micro-dureté (**Figure III.1-3**) par indentation réalisées par Wild [WIL 03] ont montré que les phases blanches présentaient une dureté comprise entre 700Hv et 1000Hv contre 300Hv pour la nuance d'acier à rail avant mise en circulation. L'évolution du module d'Young a également été étudiée. Ainsi à partir d'essais de dureté, Lojkowski [LOJ 01a] rapporte une valeur de 245 GPa dans la phase blanche contre 212 GPa pour la structure d'origine. Par sa propre méthode décrite dans [MOY 03], Moylan note également une augmentation du même ordre de grandeur du module d'Young avec une valeur de 233 GPa contre 218 GPa pour le substrat.

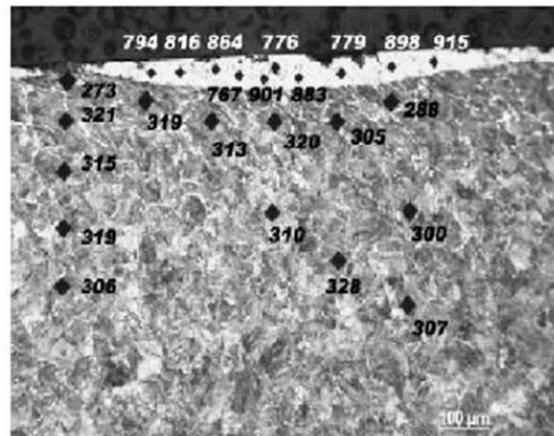


Figure III.1-3: Mesure de micro dureté en présence de phase blanche [WIL 03]

Afin de mieux comprendre cette évolution des propriétés mécaniques du matériau, de nombreux auteurs se sont intéressés à la structure cristalline de la phase blanche.

III.1.2.2 Discussion sur la structure cristalline de la phase blanche

La structure de la phase blanche n'est pas parfaitement établie dans la littérature et semble légèrement varier d'une étude à l'autre, au gré des échantillons et donc des conditions de contact.

Au début du 20^e siècle, la première observation [HCC 00] d'une phase non attaquable au Nital à la surface des rails a été supposée de nature martensitique (**Figure III.1-4**), du fait de sa grande dureté et de sa ressemblance aux structures issues de trempes rapides (voir **I.1.3.2**). L'utilisation de la microscopie électronique par transmission a permis à Newcomb et Stobbs [NEW 84] de confirmer la structure quasi-martensitique de la phase blanche avec disparition des carbures de fer (Fe₃C) au sein de cette phase. Cependant, la nature très déformée du matériau les empêche de déterminer les paramètres de mailles¹³. Une composition de la phase blanche à base de martensite conventionnelle est alors remise en cause dans la littérature. D'autant plus que leurs propriétés mécaniques divergent notablement comme le souligne Carrol [CAR 05]. Avec une dureté de 1000 Hv et une température de recuit supérieure à 800°C, la phase blanche est sensiblement différente d'une structure martensitique classique obtenue par trempe et caractérisée par une dureté de l'ordre de 500 Hv et une température de recuit de 500°C [KUZ 63]. Cette augmentation de la température de recuit traduit potentiellement une plus grande stabilité énergétique de la phase blanche.

¹³ Les paramètres de mailles sont les dimensions caractéristiques inter-atomiques de la structure cristalline dans les 3 directions de l'espace. Ils sont utilisés pour identifier la nature d'une structure inconnue.

Les résultats d'observations avec des moyens de plus en plus récents ont alors mené à la conclusion que la phase blanche n'est pas une martensite conventionnelle, mais plutôt une structure nanocristalline composée soit de martensite, soit de ferrite super-saturée¹⁴ en carbone (**Figure III.1-4**).

A partir de mesures d'angles de diffractions des rayons X permettant de déterminer les paramètres de mailles, Pyzalla [PYZ 01] conclut à une structure martensitique caractérisée par une taille de grains inférieure à 10nm et un ratio de paramètres de maille de l'ordre de 1.01. Lojkowski [LOJ 01b] et Baumann [BAU 96] observent de leur côté une structure cristallographique très déformée par rapport à celle du substrat avec une taille de grains moyenne de l'ordre de 25nm constitués de ferrite super-saturée. Dans les deux cas, l'augmentation de dureté s'explique alors à la fois par la réduction de taille des grains et l'enrichissement en carbone de la microstructure.

La distinction entre martensite et ferrite super-saturée peut sembler anecdotique, car elle repose finalement sur la direction de déformation des mailles. Dans le cas de la martensite, sous l'action de l'insertion des atomes de carbone, la maille se déforme dans une seule direction, on obtient alors une maille quadratique et non plus cubique. Dans le cas de la ferrite, la saturation de sa maille cristallographique suppose une déformation plastique préalable, puis à une déformation due à l'insertion du carbone. La maille est déformée dans plusieurs directions à la fois (**Figure III.1-4**). Les deux termes désignent donc une même maille cubique centrée enrichie en carbone, mais avec des directions de déformations différentes. Les difficultés pour déterminer précisément cette direction et les différents historiques de contact rendent difficile la classification des microstructures.

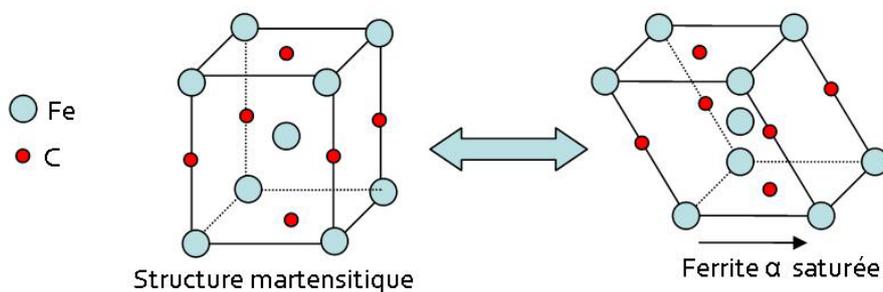


Figure III.1-4 : Equivalence des structures cristallographiques de type martensite et ferrite saturée

Plus prosaïquement, la distinction sémantique utilisée par les auteurs pour désigner la microstructure reflète le mécanisme de formation supposé de la phase blanche. Pour un mécanisme principalement thermique, on utilisera le terme martensite, alors que dans le cas d'un phénomène mécanique on lui préférera le terme de ferrite saturée.

¹⁴ On parle de super-saturation pour souligner un nombre atomes d'insertion au sein de la maille supérieur au nombre de sites d'insertion classiquement disponibles au sein d'une telle structure cristalline. Cette situation est rendue possible par la déformation importante des mailles.

III.1.3 Hypothèses sur la formation de la phase blanche

III.1.3.1 Deux moteurs de formation : thermique et mécanique

- Thermique :

Dans l'industrie métallurgique, la manière classique de produire de la martensite à partir d'un acier perlitique est de chauffer cette nuance au-delà de la température du point eutectoïde¹⁵ et de refroidir l'ensemble très rapidement par trempe (**Figure III.1-5**).

Certains auteurs, comme Mitao [MIT 99], Clayton et Allery [CLA 82] ont appliqué ce mécanisme au contact roue/rail. Le cycle d'élévation de température proviendrait soit d'un glissement important de la roue sur le rail soit d'après Nakkalil [NAK 91] à la plastification brutale d'aspérité et à la naissance de températures flash (voir I.2.2).

Cette dernière proposition semble être en accord avec l'apparition des phases blanches en bandes isolées (puis à leur unification progressive) établie par Clayton [CLA 82] et Baumann [BAU 96]. De plus, l'observation par Österle [OST 01], d'austénite retenue dans la phase blanche corrobore le dépassement de la température d'austénisation pour au moins une partie de la bande de roulement.

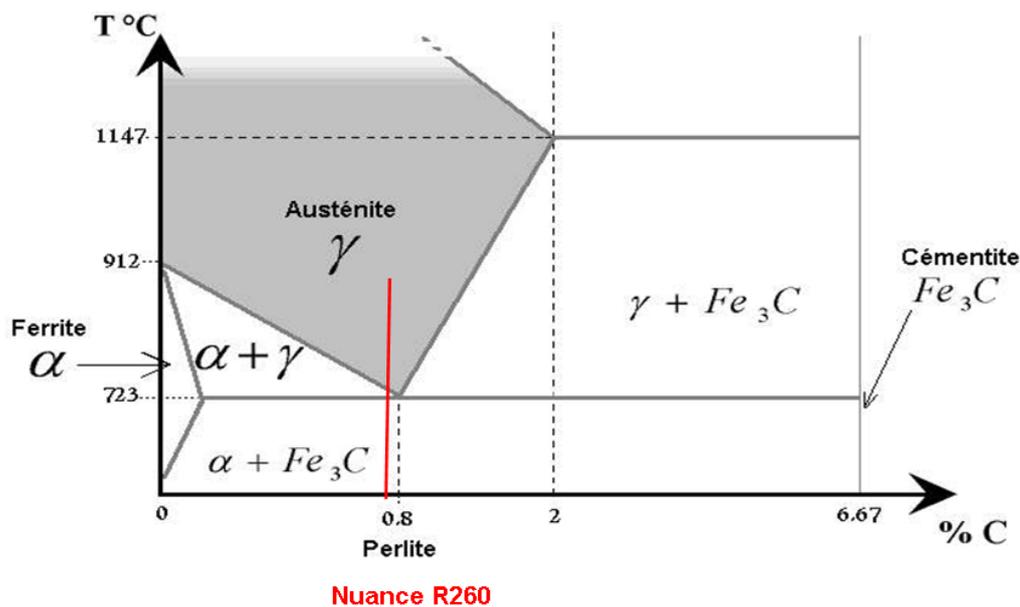


Figure III.1-5 : Diagramme d'équilibre Fer-Carbone et position de la nuance R260

Dans le cas du contact roue/rail, le cycle de refroidissement très rapide est obtenu en combinant la faible surface chauffée et le drainage de chaleur par le reste du rail resté à température ambiante.

¹⁵ La transformation eutectoïde est une transformation de phases en phase solide qui se déroule à température constante.

Par exemple pour les aciers cette transformation a lieu à 723 °C. L'austénite se solidifie en cémentite (Fe₃C) et en ferrite α. Le composé lamellaire obtenu est nommé "perlite" (voir Chapitre I).

- Mécanique :

Cependant, certains auteurs comme Newcomb et Stobbs [NEW 84] ou Lojkowski [LOJ 01b] contestent ce scénario purement thermique. En effet, d'après leurs calculs, même en prenant en compte l'influence de la pression hydrostatique et de l'écrasement du matériau sur la température eutectoïde, la valeur de 500-600°C à atteindre suppose encore des glissements très importants et peu probables dans des conditions de circulation classique. De même, après les premiers cycles de plastification du rail, les aspérités donnant naissance à des températures flash de niveaux élevés n'ont plus lieu d'être. Carroll [CAR 05] ajoute que le temps de diffusion nécessaire aux atomes augmente rapidement avec la baisse de température et devient vite comparable voire supérieur au temps de contact roue/rail.

Pour ces raisons, Newcomb et Stobbs [NEW 84]¹⁶, propose une origine mécanique de la phase blanche sans élévation de la température : Sous des conditions de pression et de cisaillement suffisantes, les mailles de ferrite se déforment et donnent naissance à un grand nombre de dislocations. À ce stade, il devient plus attractif pour les atomes de carbone de migrer de la structure cristalline de la cémentite vers les dislocations. Le mécanisme mène alors à la rupture et à la dissolution des lamelles de cémentite dans la matrice de ferrite et à la formation de mailles quadratiques très déformées. Ce mécanisme est à mettre en lien avec le phénomène de rochet présenté dans la partie **I.3.1.1**. Le mécanisme proposé par Newcomb et Stobbs montre que l'accumulation de déformations plastiques n'est pas sans conséquence sur la structure cristallographique du matériau. La naissance d'un grand nombre de dislocations dues au phénomène de rochet peut conduire à un changement de phase se produisant entre l'étape d'épuisement de ces capacités d'adaptation plastique et la fissuration.

Finalement, deux mécanismes d'origines différentes et menant à des structures proches mais spécifiques ont été proposés : L'un avec une origine thermique et l'autre avec une origine mécanique. Cependant, les observations sur le terrain menées lors de différentes études [SCH 12, STE 13, DAN 13] conduisent à ne pas strictement opposer ces deux propositions et à proposer un mécanisme global de formation des phases blanches.

III.1.3.2 Une origine plus complexe

Plusieurs études sur la phase blanche amènent à trouver des cas où la thermique est supposée dominante [FLE 13, SCH 12] et d'autres pour lesquels la mécanique semble prépondérante [CLA 82, GAV 03]. Dans la majorité des cas, les phénomènes ne sont pas exclusifs et de plus en plus une vision globale associant un équilibre entre les deux phénomènes émerge [ANT 10, SCH 12, STE 13, GRA 13].

Dans le cas de l'acier à rail, l'élément au cœur des mécanismes de formation de phase blanche est la migration des atomes de carbone de la cémentite vers la ferrite. Dans un réseau cristallin, la migration d'un atome est rendue possible s'il possède l'énergie suffisante pour écarter de leur position d'équilibre les atomes présents entre sa position initiale et son lieu de migration. Ce niveau d'énergie est appelé barrière d'énergie potentielle [GUI 94] et noté E_p . Pour migrer, un atome doit donc gagner en énergie et/ou voir abaisser cette barrière énergétique (par la proximité d'un site de migration ou une faible énergie de liaison des atomes adjacents par exemple). Comprendre la formation des phases blanches revient donc à expliquer le passage au niveau d'énergie nécessaire pour permettre un nombre élevé de migrations d'atomes de carbone afin de saturer les mailles de ferrite.

¹⁶ Newcomb et Stobbs s'appuient et extrapolent sur le modèle d'interaction entre les atomes de carbone et les dislocations proposé par Kalish et Cohen [KAL 70]. Ils montrent notamment que l'énergie d'interaction entre le carbone et la dislocation peut être légèrement supérieure à l'énergie de liaison du carbone dans la cémentite.

Ce niveau d'énergie permettant la diffusion d'un atome met en jeu plusieurs facteurs potentiels d'influence (dont plusieurs exemples sont donnés par la suite). Cependant, les interdépendances complexes entre ces facteurs les rendent difficiles à décrire dans leur globalité. Pour donner une vue schématique des phénomènes mis en jeu, la figure suivante (**Figure III.1-6**) illustre l'équilibre qui existe entre les champs mécaniques, thermiques, le potentiel physico-chimique et le niveau énergétique des atomes au sein de la microstructure.

À titre d'exemples, quelques interactions qui agissent sur les possibilités de migration atomique au sein de la microstructure peuvent être listées :

- Les contraintes mécaniques induisent une énergie de déformation au sein de la microstructure qui casse les liaisons existantes, produit des dislocations et entraîne directement la migration des atomes [NEW 84]. Certaines fréquences de contact¹⁷ également semblent faciliter la migration des atomes en fournissant à la fois une énergie supplémentaire et en permettant une mise en contact statistiquement plus élevée des atomes et des sites de migrations [BER 97],
- L'augmentation de température entraîne une agitation thermique, fournissant une énergie aux atomes de carbone et les rendant plus mobiles. De manière indirecte, elle permet une plus grande plasticité du matériau et donc la naissance d'un plus grand nombre de dislocations,
- Les interactions physico-chimiques jouent également un rôle important sur le niveau de la barrière d'énergie potentielle à franchir. Certains éléments d'alliage [GAV 03, STE 13] comme le Manganèse accélèrent la décomposition des lamelles de cémentite en renforçant les interactions carbone-dislocations ou au contraire retarde le phénomène comme le Cobalt ou le Nickel en stabilisant la cémentite.

¹⁷ La fréquence de contact correspond au rapport entre la vitesse linéaire de la roue et la taille de du contact dans la direction de circulation. Pour une circulation à 80km/h et un contact de 20mm, cette fréquence est de l'ordre de 1100 Hz.

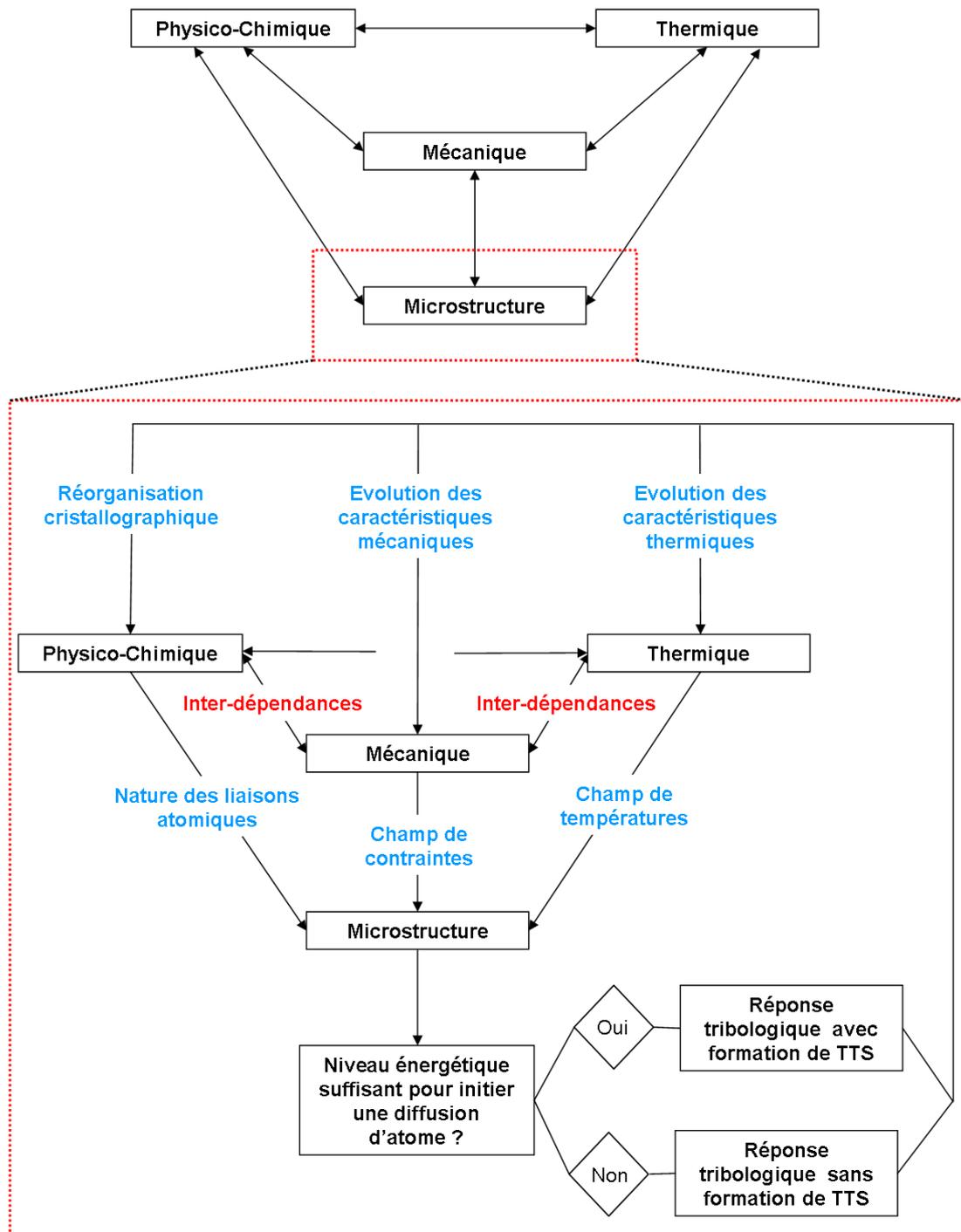


Figure III.1-6 : Schéma des dépendances menant à la formation des TTS.

Ainsi, une étude exhaustive des conditions de formation de la phase blanche devrait prendre en compte et quantifier l'équilibre énergétique entre tous ces différents phénomènes. Néanmoins, une telle étude est difficile à mettre en œuvre. De plus, pour un cas d'étude donné, un de trois champs de contraintes (mécaniques, thermiques ou physico-chimiques) peut être jugé dominant et moteur dans la migration des atomes. Le problème peut alors être simplifié et il est pertinent de mobiliser les moyens d'essais sur cet élément jugé moteur. Tel est le cas dans la zone d'étude de Bussy-St-Georges.

III.1.3.3 Cas d'étude de Bussy-St-Georges

Dans le cas du rail issu de la zone de squat de Bussy-St-Georges, étudié dans le **Chapitre II**, un équilibre des différents mécanismes existe. Aussi le schéma global de formation des TTS reste évidemment valide. Néanmoins, les observations métallurgiques réalisées nous permettent de supposer une dominance importante du champ de contrainte mécanique. En effet, les marqueurs d'efforts de contact intenses sont nombreux sur les coupes observées dans le substrat : écrouissage du matériau, rapprochement et réorientation des lamelles de cémentites, réorientation des joints de grain (**Figure III.1-7**).

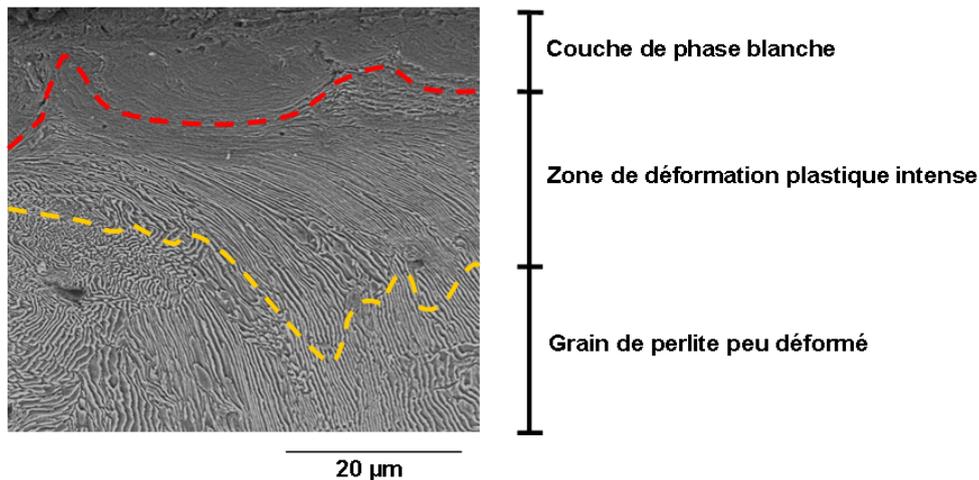


Figure III.1-7 : Zoom à l'interface phase blanche/perlite de la bande II-2 (II.2.2.2)

Au contraire les marqueurs d'un phénomène thermique important et moteur dans la formation de phase blanche ne sont pas visibles. La phase blanche semble homogène, sans présence des témoins d'élévation importante de température du type austénite résiduelle recuite ou prolongation joints de grains qui se prolongent dans la phase blanche [FLE 13]. De plus, les transitions entre phase blanche et substrat sont progressives avec une dissolution graduelle des lamelles de cémentite (**Figure III.1-7**), contrairement aux transitions brutales observées sur des phases blanches thermiques. En effet, ce type de transition abrupte est visible pour les phases blanches créées artificiellement par passage d'un courant électrique [CAR 05] ou échauffement laser [OST 01] ou encore issues d'un échauffement dû au glissement roue/rail [NAK 91] (**Figure III.1-8**). Enfin, la zone étudiée en fin d'accélération du train semble peu susceptible d'être soumise à de forts glissements de la roue sur le rail. L'élévation de température nécessaire à la création de phases blanches serait donc issue de températures flash (voir I.2.2) dont l'aspect local semble peu compatible avec l'étendue de phase blanche observée sur la quasi-totalité de la bande de roulement.

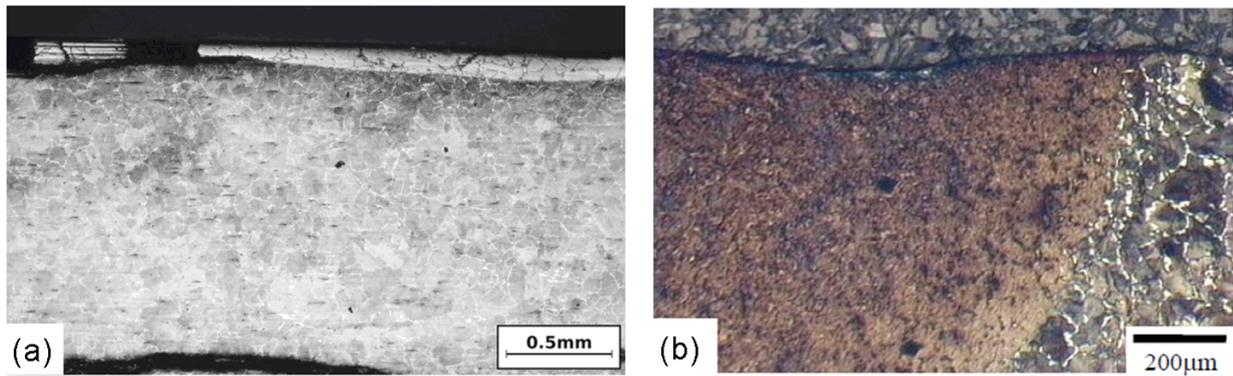


Figure III.1-8 : (a) Phase blanche supposée thermique observée sur le métro londonien [FLE 13]
 (b) Phase blanche (de couleur brune ici) créée artificiellement par point de chauffe [CAR 05]

L'influence de la physico-chimie sera également consciemment écartée dans cette étude pour deux raisons. D'une part, car les paramètres environnementaux à prendre en compte sont extrêmement nombreux et divers (intempéries, pollution, potentiel électrique...), multipliant ainsi les moyens d'essais nécessaires à leur caractérisation. D'autre part, l'aspect physico-chimique, s'il est potentiellement un facilitateur ne semble pas être le discriminant dans la formation du squat sur le site Bussy-St-Georges. En effet dans cette zone, les caractéristiques environnementales et les coulées de rails (susceptibles de présenter un taux plus ou moins élevé d'impuretés) utilisées sont communes avec d'autres parties du réseau qui ne développent pas de squat.

En conclusion, pour la zone de Bussy-St-Georges, la formation de phase blanche sera supposée guidée par le champ de contrainte mécanique et potentiellement facilitée par élévation de température limitée (Figure III.1-9).

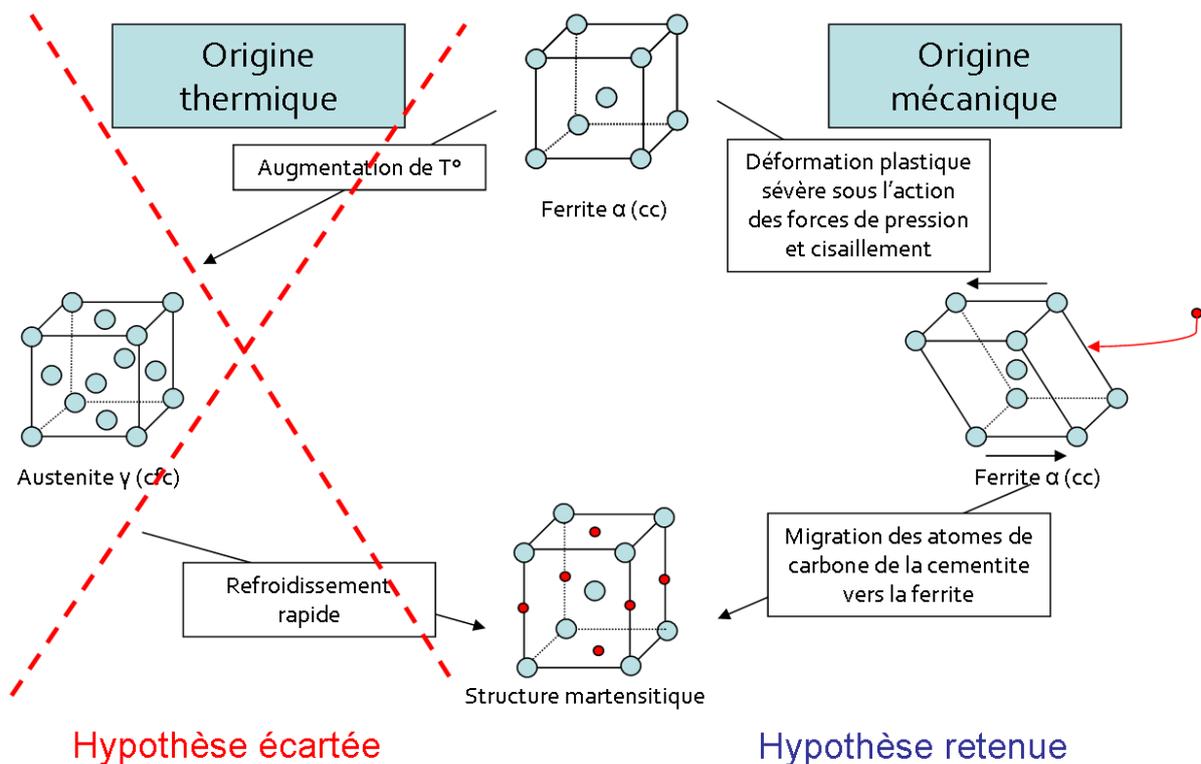


Figure III.1-9 : Mécanismes préférentiels de formation de la phase blanche

III.2 Scénario d'amorçage

Les conditions d'apparition des phases blanches étant désormais établies et semblant être liées principalement aux champs de contraintes mécaniques subis par le rail, un scénario d'amorçage du squat reliant les efforts mécaniques roue/rail et la microstructure peut être proposé.

III.2.1 Gradient de microstructures et amorçage de fissuration

À la lumière de l'organisation de la bande de roulement à proximité d'une fissure naissante et des mécanismes de formation de la phase blanche, un scénario d'amorçage du squat semble se dégager pour notre zone d'étude (**Figure III.2-1**).

À la pose d'un rail neuf, dont la microstructure est vierge de toute anisotropie, la dynamique ferroviaire va imposer un déplacement relatif roue/rail. La localisation du contact dépend donc des conditions de circulations macroscopiques telles que la vitesse, le niveau de chargement ou les conditions d'adhérence... Train après train, une accumulation différente de conditions de contact prend place le long du profil transversal et se répartit en bandes, en particulier en termes de valeurs et de directions des efforts de cisaillement. Ainsi petit à petit, la microstructure du rail change de façon unique et spécifique sur chaque bande longitudinale de contact : les grains de perlite s'écrasent, la matrice ferritique se déforme et les lamelles de cémentite s'orientent parallèlement à la direction de cisaillement, avec un angle plus ou moins fort suivant l'intensité des efforts de cisaillement locaux. La dispersion des conditions de contacts crée donc en surface un gradient de déformations plastiques.

Ces déformations plastiques introduisent des glissements de plans cristallographiques et donnent naissance à un grand nombre de dislocations. Lorsque la barrière d'énergie de diffusion est franchissable, par un apport direct d'énergie et/ou par une diminution de la quantité d'énergie à apporter, la migration du carbone est rendue possible. Les premières phases blanches apparaissent. L'extrême surface des bandes de déformations plastiques évolue alors progressivement en couche continue de phase blanche plus ou moins épaisse. Graduellement, différentes microstructures coexistent côté à côté. À la surface de la bande de roulement, on peut parler d'un différentiel de transformations tribologiques.

Après un certain nombre de passages de roues, la microstructure de chaque bande continue à s'adapter aux conditions de contact avec sa propre réponse tribologique, et petit à petit, les propriétés mécaniques (dureté, module d'Young, direction d'anisotropie...) de chacune d'entre elles deviennent radicalement différentes. Ainsi, la frontière entre ces bandes constitue un lieu de concentration de contraintes mécaniques résiduelles à la surface du matériau, à partir duquel peut s'amorcer une fissure à cause d'un choc isolé, d'une dynamique locale du contact ou d'une délamination de la matière due à une inhomogénéité trop forte... : Il y a amorçage du squat.

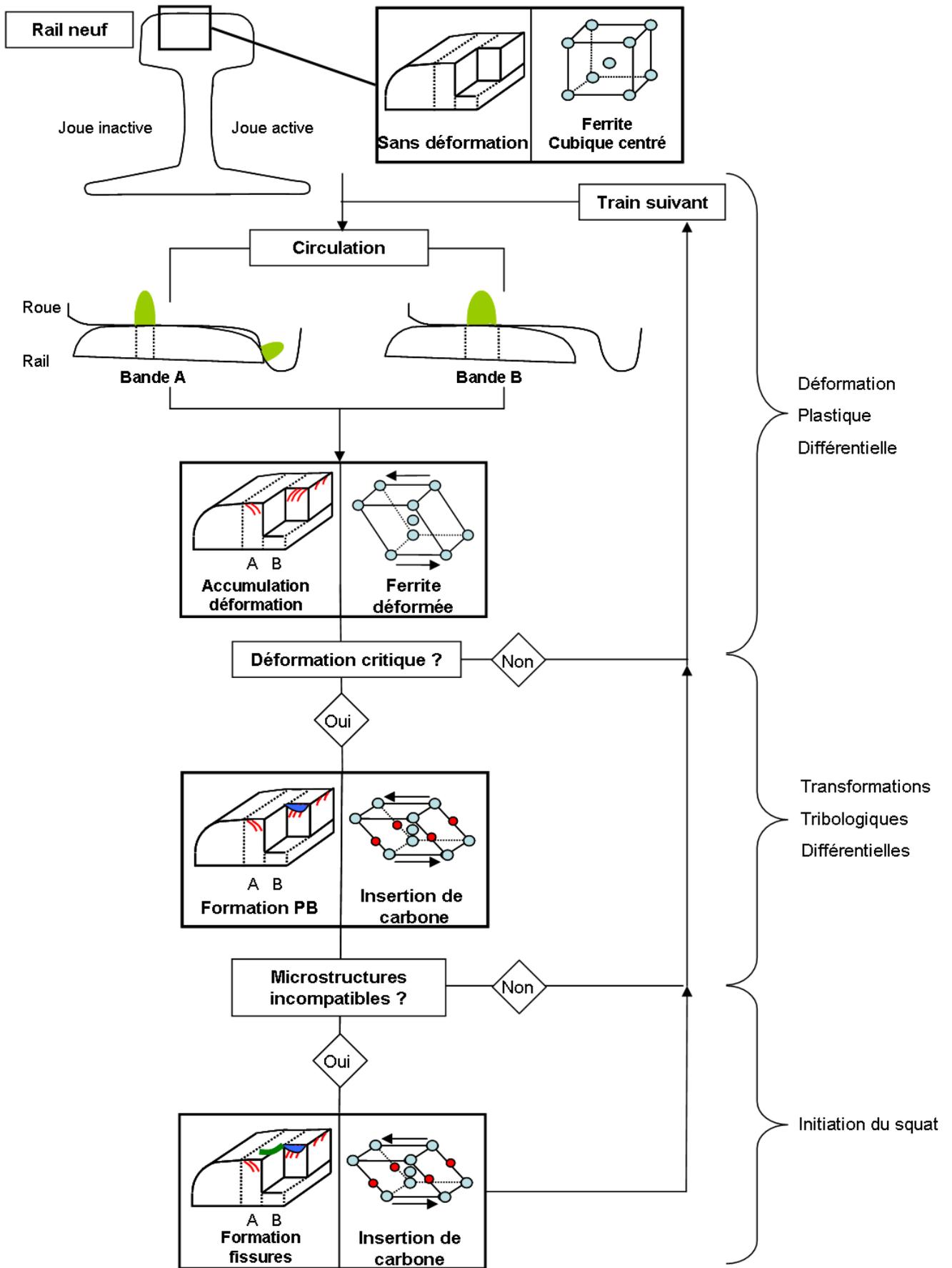


Figure III.2-1 : Scénario d'amorçage du squat

III.2.2 Hypothèses et limites du scénario

Pour compléter les hypothèses proposées dans le scénario précédent, plusieurs hypothèses ont besoin d'être validées et quantifiées.

Dans un premier temps, les conditions de contact globales et locales doivent être clarifiées. L'hypothèse de formation thermique de la phase blanche ayant été écartée, on suppose que les glissements macroscopiques de la roue/rail ne sont pas suffisamment importants pour générer une élévation notable de la température à la surface du rail. Cette hypothèse forte mérite d'être validée par des mesures de glissements roue/rail. De plus, si les déformations observées laissent peu de doutes quant à l'origine mécanique du phénomène de formation de la phase blanche dans le cas de Bussy-St-Georges, le niveau d'effort requis pour déclencher cette transformation de phase solide/solide est encore flou, notamment en termes de cisaillement. De plus, l'aspect continu de la microstructure laisse supposer que la dynamique du contact est établie dans la zone. Une instrumentation du contact roue/rail semble donc nécessaire et suffisante malgré les limites techniques actuelles (voir **I.2.1.3**).

Deuxièmement, le niveau de cisaillement de la surface du rail (similaire à des observations de rails provenant de courbes [IWN 06]) est plutôt élevé pour une voie en alignement, il est légitime de se demander quel comportement dynamique du train génère de tels efforts, notamment dans la direction de circulation. En particulier, la localisation privilégiée de chacune des roues du train sur la bande de roulement paraît indispensable pour comprendre la formation de la microstructure organisée en bandes longitudinales.

Dernier point, la définition du nombre de cycles nécessaires à la formation de phase blanche est rendue difficile par l'historique complexe subi depuis 1995 par le rail étudié. Le suivi d'un rail neuf permettrait d'affiner la durée de vie ou le tonnage nécessaire à la formation de cette microstructure.

En conclusion, le scénario tribologique de formation des squats nécessite donc des essais de validation à différentes échelles temporelles et spatiales, du contact roue/rail à la dynamique du train entier. Le suivi à partir de la pose du rail d'une zone de formation potentielle de squats apparaît également indispensable.

Partie 2 :

Validation et généralisation du scénario d'amorçage du défaut de Squat

Chapitre IV : Chapitre 4 : Essai Interface Roue/Rail

Comme évoquée précédemment, la validation du scénario tribologique de formation des squats proposé au **Chapitre III** passe par la mesure des conditions de contacts des zones de défauts. Un train a donc été instrumenté et mis en circulation pour déterminer, au mieux des possibilités de mesures actuelles, les conditions de contact spécifiques dans les zones de squats. Ainsi, pour l'essai Interface Rail/Roue (et noté ultérieurement IRR), l'instrumentation a été pensée afin d'éclairer les différentes zones d'ombres du scénario d'amorçage du squat (**III.2.2**). Ainsi, elle a pour objectifs de :

- Mesurer le comportement de l'anti-enrayeur et les niveaux de glissements roue/rail.
- Identifier les niveaux d'efforts appliqués par la roue sur le rail des zones à squats.
- Surveiller le comportement dynamique et l'inscription du train dans les alignements développant du squat.
- Quantifier la dispersion de la localisation des contacts pour comprendre la formation du motif de microstructures par bandes longitudinales.

Après une brève description de l'instrumentation embarquée sur le train durant l'essai, puis de l'organisation des circulations d'essai réalisées, ce chapitre abordera les résultats concernant chacun des objectifs précédemment cités.

Pour faciliter la lecture de ce chapitre, les descriptions de l'instrumentation et de l'essai seront très générales. Cependant, des détails supplémentaires pourront être trouvés dans [NVT 11, ZIT 11, LEM 12, CON 12, BLA 13].

IV.1 Description de l'instrumentation

Pour mesurer les conditions de contact au plus près et sur de longues distances, un train MI2N (voir **I.1.2**) a été instrumenté tant à l'échelle du contact roue-rail qu'à celle de l'ensemble du véhicule. A mi-chemin entre deux cycles de maintenance, ce train sera considéré comme représentatif du comportement moyen des trains MI2N circulant sur la portion de voie étudiée.

De plus, afin de rendre la collecte de données la plus pertinente et la plus large possible, les deux voitures de tête ZRB et ZAB (pour des circulations voie 1, c'est-à-dire de l'ouest vers l'est) ont été instrumentées, permettant ainsi de réaliser les mesures sur une voiture porteuse et la première voiture motrice située derrière (**Figure IV.1-1a**). La numérotation des différents éléments instrumentés est donnée en **Figure IV.1-1b**.

Les parties suivantes détailleront l'instrumentation embarquée sur chacune des voitures. Un bilan synthétique de l'instrumentation est disponible dans la Partie **IV.1.4**.

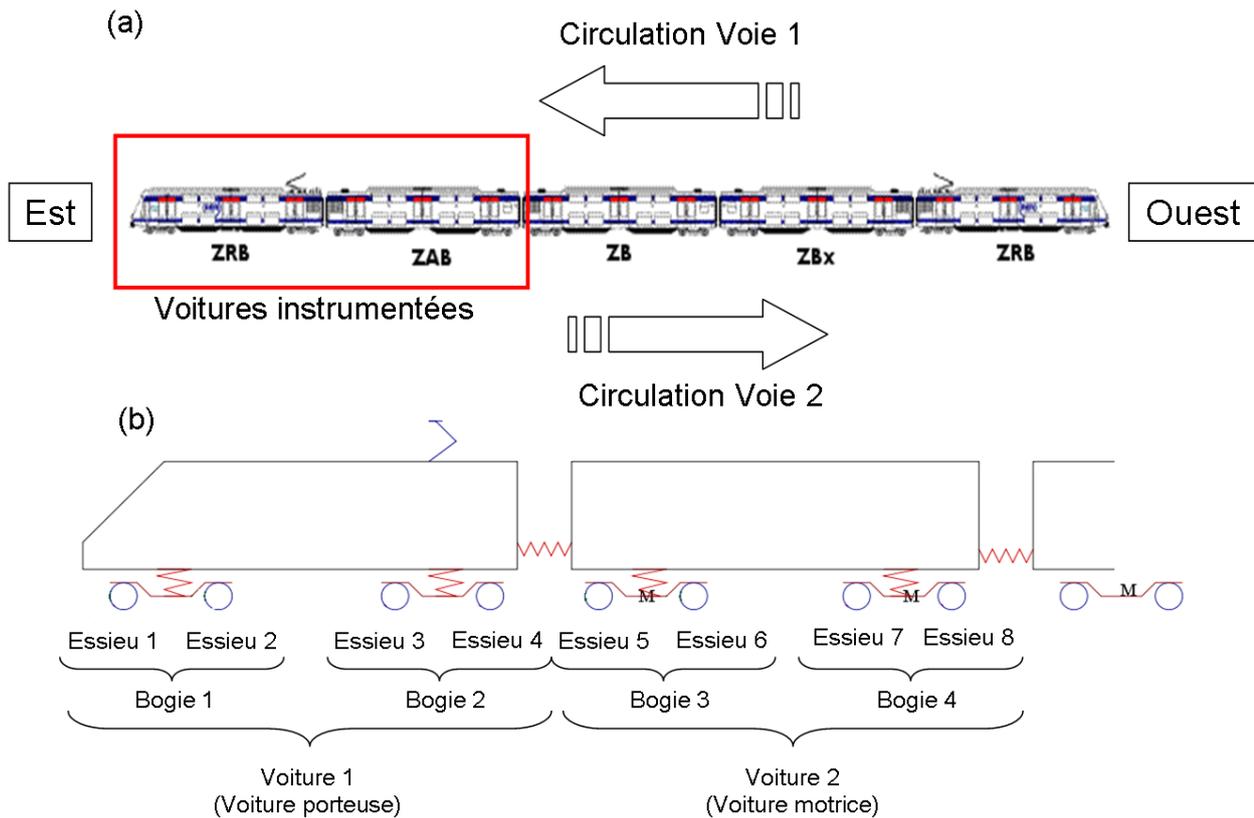


Figure IV.1-1: (a) Orientation de l'instrumentation et du sens de circulation, (b) Définition de la numérotation utilisée

IV.1.1 Mesure des efforts de contact : double instrumentation

IV.1.1.1 Chaîne de mesure AEF

Pour des raisons financières et techniques décrites ultérieurement, deux technologies différentes de mesure d'efforts au contact ont été mises en place sur les bogies avant et arrière de deux premières voitures. Le premier bogie de chaque voiture au sens d'une circulation voie 1 (circulation Ouest-Est), a été équipé par l'Agence d'Essais Ferroviaires (AEF) d'une instrumentation identique à celle utilisée lors de l'homologation¹⁸ des véhicules.

Les voiles (**Figure I.1-9**) de roues de ces 4 essieux sont percés uniformément le long du profil (**Figure IV.1-2**) et équipés de jauges de déformation. Les signaux sont remontés en bout d'essieux vers des collecteurs tournants (**Figure IV.1-3**) et envoyés à un ordinateur, chargé de reconstituer les efforts de contact à partir des mesures de chacune des jauges. Une fois cet algorithme appliqué, on aboutit aux efforts roue/rail globaux dans les trois directions pour chacune des roues : X l'effort longitudinal, Y l'effort transversal et Q l'effort vertical.

¹⁸ Homologation : Etape de certification conforme d'un train vis-à-vis de la sûreté ferroviaire suivant les recommandations de l'EPSF (Etablissement Public de Sécurité Ferroviaire).

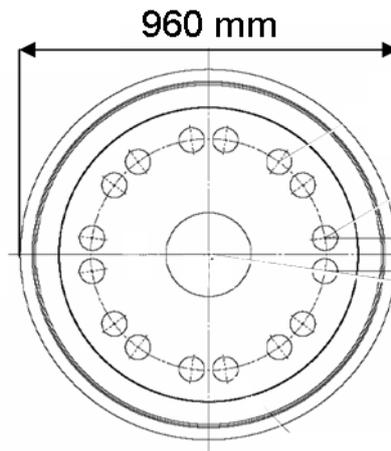


Figure IV.1-2 : Localisation du perçage sur les voiles de roues

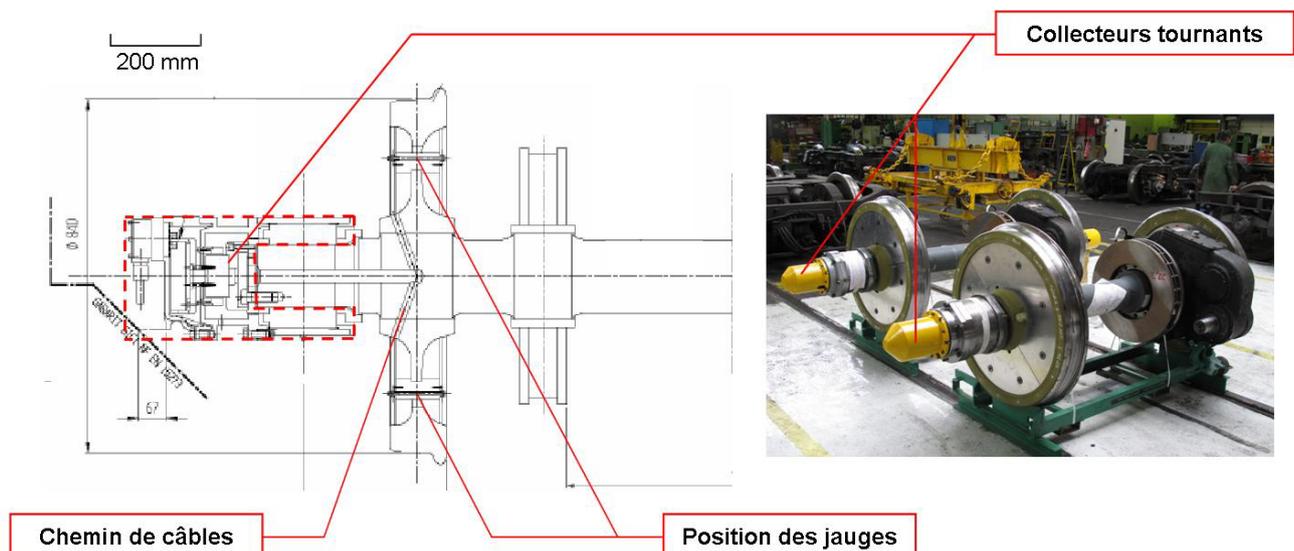


Figure IV.1-3 : Instrumentation type "Essieu d'homologation"

Le mouvement relatif des jauges par rapport au point de contact impose, pour reconstruire l'effort au contact à partir des signaux de celles-ci, une vitesse du train supérieure à 30 km/h et limite la fréquence d'échantillonnage du système de mesure. Par cette méthode, les mesures Y et Q sont ainsi fiables jusqu'à 200Hz et seulement 50 Hz en X, soit respectivement un point tous les 110 mm et 440 mm pour une circulation à 80 km/h. La bande passante de cette mesure semble suffisante pour expliquer le comportement moyen d'un train et l'apparition de la microstructure par bandes qui apparaît sur plusieurs dizaines de mètres. Cependant, au vu de la dimension d'un squat naissant et du motif périodique (de longueur d'onde égale à 40mm, soit environ 555 Hz à 80 km/h) apparu sur la bande de roulement (II.2.2.1), la bande passante de cette instrumentation est trop basse pour déceler d'éventuels comportements hautes fréquences (compris entre 500Hz et 2000Hz) à même d'induire la décohésion initiale de la matière et la naissance du squat.

IV.1.1.2 Chaîne de mesure LEM

Pour répondre à cette problématique, une seconde solution technique (**Figure IV.1-4**) réalisée par le Laboratoire Essais et Mesures (LEM) de la RATP a été adoptée sur les deux autres bogies des voitures instrumentées (Bogies 2 et 4). Dans ce cas, on place des jauges sur les boîtes à bras, la pièce fixe (par rapport à l'essieu) qui relie le roulement de l'essieu au bogie.

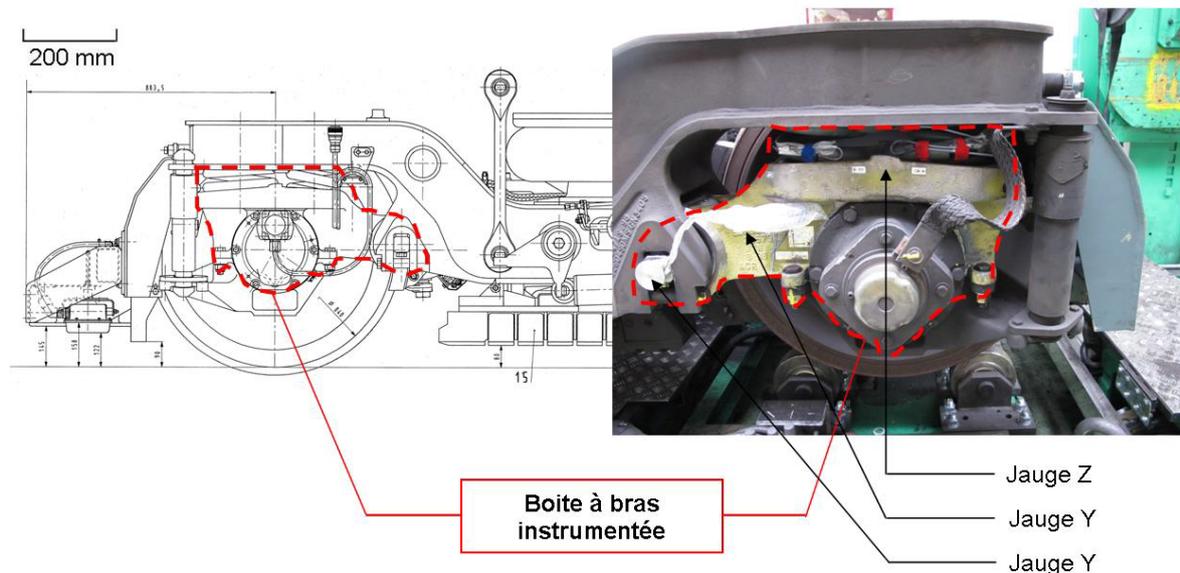


Figure IV.1-4 : Boîtes à bras instrumentées

L'avantage du montage sur une pièce fixe est de permettre une mesure même à l'arrêt et à des fréquences d'échantillonnage plus élevées (800 Hz pour X, Y et Q) permettant d'étudier des phénomènes à très faibles longueurs d'ondes.

En contrepartie, plusieurs problèmes se posent vis-à-vis de cette instrumentation. Tout d'abord, la position des jauges implique que les mesures sont plus éloignées du contact et donc potentiellement filtrées par l'essieu. Dans cette étude, on fera l'hypothèse que la rigidité de l'essieu est suffisante pour négliger ce phénomène sans toutefois pouvoir le vérifier.

De plus, l'exploitation des données LEM est moins directe que celles fournies par l'AEF. En effet, premièrement, le passage des mesures depuis cette position décentrée vers les efforts de contact implique un calcul de report statique fonction des paramètres géométriques de l'essieu et de son accélération transversale (voir [PEL 08, ZIT 11] pour les équations complètes). Deuxièmement, du fait de l'instrumentation utilisée, les données fournies sont des mesures relatives du comportement du train autour de sa position statique. Cette position est déterminée par des mesures complémentaires de pesée statique du train. Ce n'est qu'à l'issue de ces deux étapes, potentiellement source d'erreur, que les mesures absolues des efforts, comparables à celles obtenues par l'AEF, sont obtenues et exploitées.

Enfin il faut noter que la rigidité de l'essieu implique que l'effort transversal mesuré correspond à la somme notée H des efforts transversaux vus par l'essieu et ne permet pas de discerner les efforts roues droite et gauche [PEL 08, ZIT 11].

IV.1.1.3 Redondance des chaînes de mesures et validation des données

Finalement, chaque technologie de mesures des efforts de contact employée lors de cet essai présente de forts intérêts scientifiques, mais également d'importantes limitations en termes de

post-traitement et d'interprétation. Pour s'assurer de la cohérence entre ces deux chaînes de mesures et faciliter leur comparaison, il faut noter que les systèmes AEF et LEM ont été placés en redondance sur l'essieu 1 (il s'agit donc d'un essieu porteur).

Cette démarche est particulièrement importante pour la mesure des efforts dans la direction longitudinale. En effet, lors d'essais d'homologation de véhicules, l'intérêt est principalement tourné vers le comportement transversal du train et notamment sur la valeur du rapport des efforts Y/Q , représentatif de la montée de la roue sur le rail et du risque de déraillement. De ce fait, les mesures d'efforts longitudinaux X sont rares [MAG 08], voire inexistantes sur le type de train étudié et en alignement. Il existe donc peu de données expérimentales auxquelles se référer et il est nécessaire de prévoir les moyens de valider nos mesures au cours du post-traitement de l'essai.

IV.1.2 Localisation du contact

La solution retenue pour localiser les contacts roues/rails consiste à utiliser des caméras embarquées sur le train, combinées à la projection de franges laser sur les deux solides. Cette instrumentation présente l'avantage d'offrir une grande fréquence d'échantillonnage (environ un profil tous les 24mm à 130 km/h), capable de repérer les sauts de contact le long d'une circulation. De plus, l'utilisation de plusieurs caméras permet de remonter au déplacement transversal, mais également aux angles de lacet et de roulis de la roue [NVT 11].

En tout, 4 franges sont projetées sur chaque file de rails (**Figure IV.1-5**) et les profils réels sont reconstitués a posteriori. Il y a ainsi deux caméras du côté extérieur de la voie, de part et d'autre de la roue et espacées de 20 cm par rapport à la verticale de la roue. Une autre caméra située 40 cm en amont de la roue filme le profil intérieur du rail. Enfin une dernière projette une frange laser à la verticale de la roue.

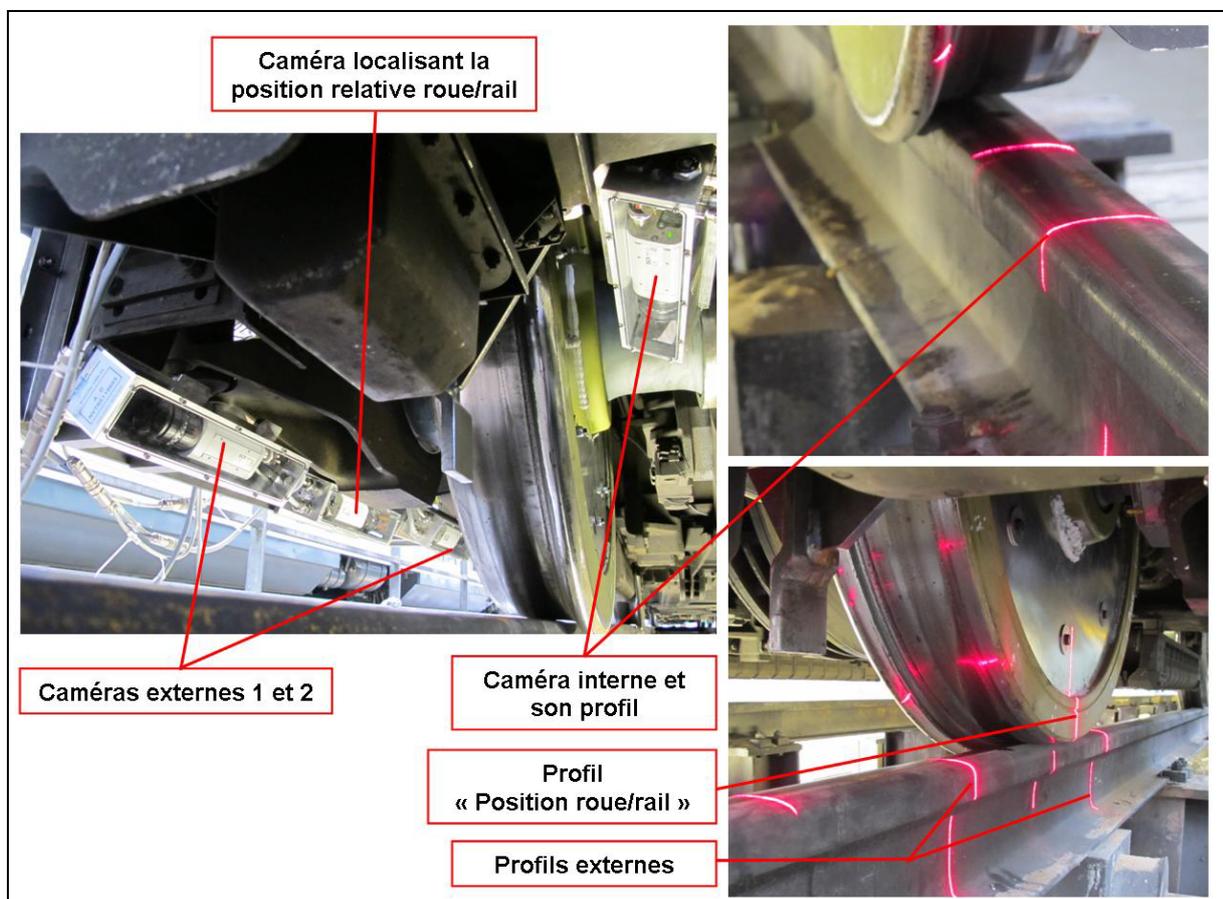


Figure IV.1-5 : Positionnement de l'instrumentation de localisation du contact roue/rail

Le profil de la roue étant supposé connu, ce dispositif permet de remonter à la position transversale roue/rail (**Figure IV.1-6**). Dans un premier temps, les profils sont filtrés pour se prémunir des effets de réflexions parasites. On construit alors le profil moyen interne issu des deux caméras internes, puis le profil complet est reconstitué en prenant en compte les différentes distances entre les caméras. Les distances relevées entre différents points de repère issus du profil de « Position roue/rail » permettent alors de caler transversalement, le profil reconstitué du rail et un profil de roue mesuré au profilomètre avant et après essai [CON 12].

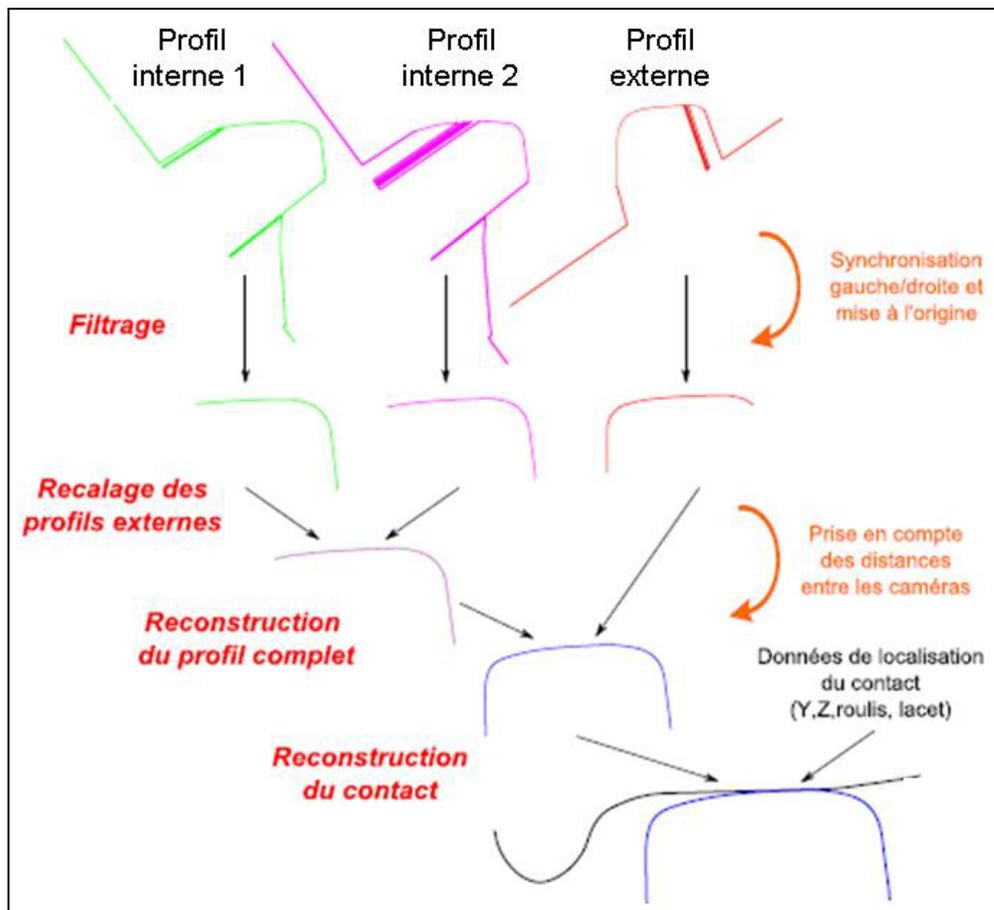


Figure IV.1-6 : Reconstitution du profil complet de rail et localisation du contact [CON 12]

L'exploitation totale des profils enregistrés se poursuit en rapprochant les mesures d'efforts de contact et les mesures de positions transversales, pour déterminer numériquement la forme de l'ellipse de contact. Cela permet, de plus, de vérifier la cohérence des deux chaînes de mesure. Faute de temps pour rendre robuste cette approche, seule la position du contact a été exploitée dans ce travail de thèse.

L'instrumentation disponible ne permettant d'instrumenter qu'un seul essieu à la fois, celle-ci a été déplacée entre l'essieu 1 durant les premières nuits d'essais et pour des raisons d'encombrement sur les bogies moteurs, répartie entre la roue gauche de l'essieu 5 et la roue droite de l'essieu 7 pour les dernières nuits.

De plus amples détails sur la reconstitution des profils et ses problématiques pourront être trouvés dans le rapport [CON 12].

IV.1.3 Identification de la dynamique du train : Suspensions et automate

L'instrumentation a également été prévue pour surveiller le comportement dynamique de la rame, à la fois dans les directions transversales et longitudinales. On surveille ainsi d'un côté les efforts transitant dans les liaisons mécaniques et de l'autre le comportement de l'automate gérant le système d'anti-patinage [LEM 12].

- Suivi des suspensions et du comportement vibratoire du train :

Les différents étages de suspensions entre essieux, bogies et caisses décrites au **Chapitre 1 (Figure I.1-3)** ont été instrumentés sur les deux premières voitures du train par des mesures de déplacement. Ces mesures sont complétées par une série de mesures d'accéléérations placées sur les différents solides composant le train.

On dispose ainsi de mesures de déplacements sur :

- Le comportement vertical des suspensions primaires des essieux 1 et 2 (**Figure IV.1-7(a)**).
- Le comportement dans les 3 directions des suspensions secondaires des bogies 1 et 3 (**Figure IV.1-7(b)**).
- L'évolution de l'écrasement longitudinal dans les pivots de bogies 1 et 3.
- Le comportement longitudinal des barres d'attelage entre les voitures 1-2 et 2-3.

Et des mesures d'accéléromètres :

- Les accélérations en X, Y et Z des caisses 1, 2 au niveau de chacun de leur bogie
- L'accélération absolue dans les 3 directions au niveau des essieux 1 et 5.
- Les accélérations relatives en X, Y et Z sur les essieux 2, 3, 4, 6, 7 et 8
- Les accélérations dans les 3 directions des 4 bogies.

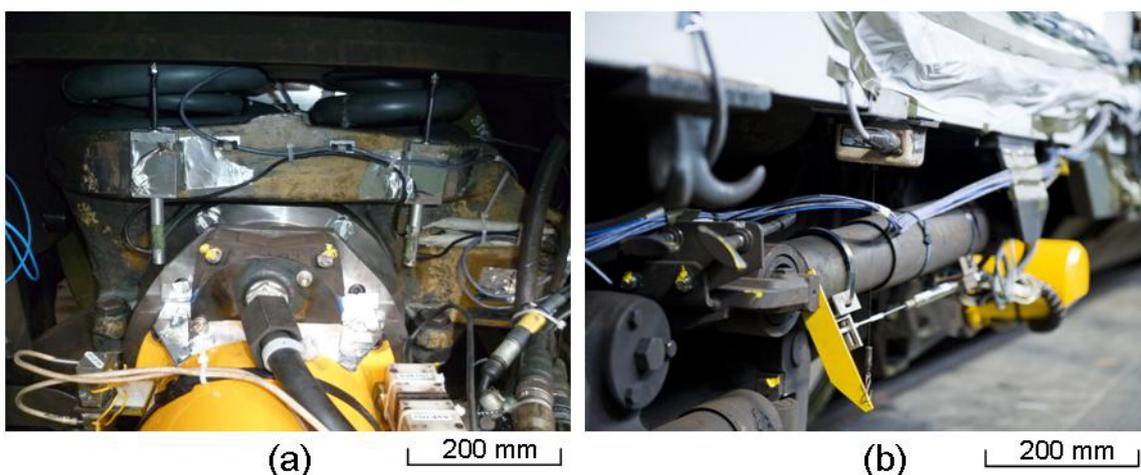


Figure IV.1-7 : Exemples de liaisons mécaniques instrumentées :
(a) Suspension primaire, (b) Amortisseur anti-lacet

- Contrôle de l'automate et du couple de traction :

De plus, afin de contrôler l'influence du système d'anti-patinage/anti-enrayage et les niveaux de glissements macroscopiques roue/rail atteints dans les zones de squats, plusieurs signaux d'entrées/sorties de l'automate de contrôle ont été collectés au cours de l'essai :

- La consigne de pilotage (directement issu du conducteur)
- Les vitesses des 8 essieux instrumentés
- Les intensités d'entrées et de sorties de l'algorithme régissant l'action de l'anti-patineur sur les bogies moteurs instrumentés (Bogies 3 et 4)
- Les couples de freinage électrique et pneumatique sur les bogies moteurs

Enfin, pour compléter l'instrumentation de l'automate et vérifier le niveau d'effort de traction en sortie du moteur, les bielles de réaction (**Figure IV.1-8**) liant par rotule les bogies aux carters des moto réducteurs engrenant les essieux 6 et 7 ont également été instrumentées par des jauges de déformations. Grâce à cette mesure, on retrouve directement le couple de traction appliqué (**I.1.2.2**) et à la somme des efforts à la jante des deux roues (voir [BLA 13]).

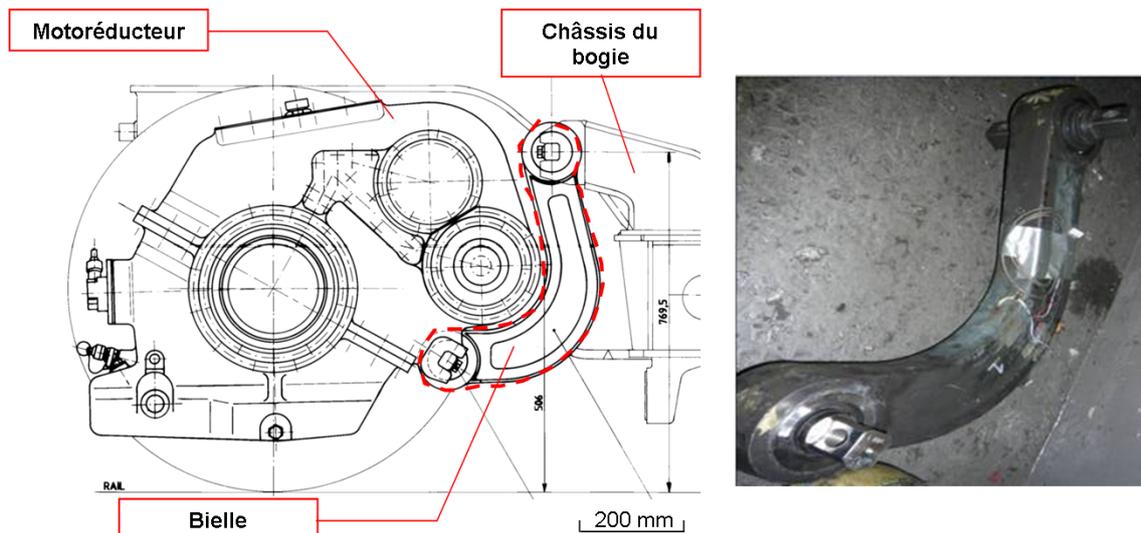


Figure IV.1-8 : Bielle de réaction instrumentée

IV.1.4 Bilan de l'instrumentation

Afin de donner une vue d'ensemble de l'instrumentation et d'en faciliter sa compréhension, la figure suivante (**Figure IV.1-9**) récapitule de manière schématique l'instrumentation embarquée sur le train d'essai.

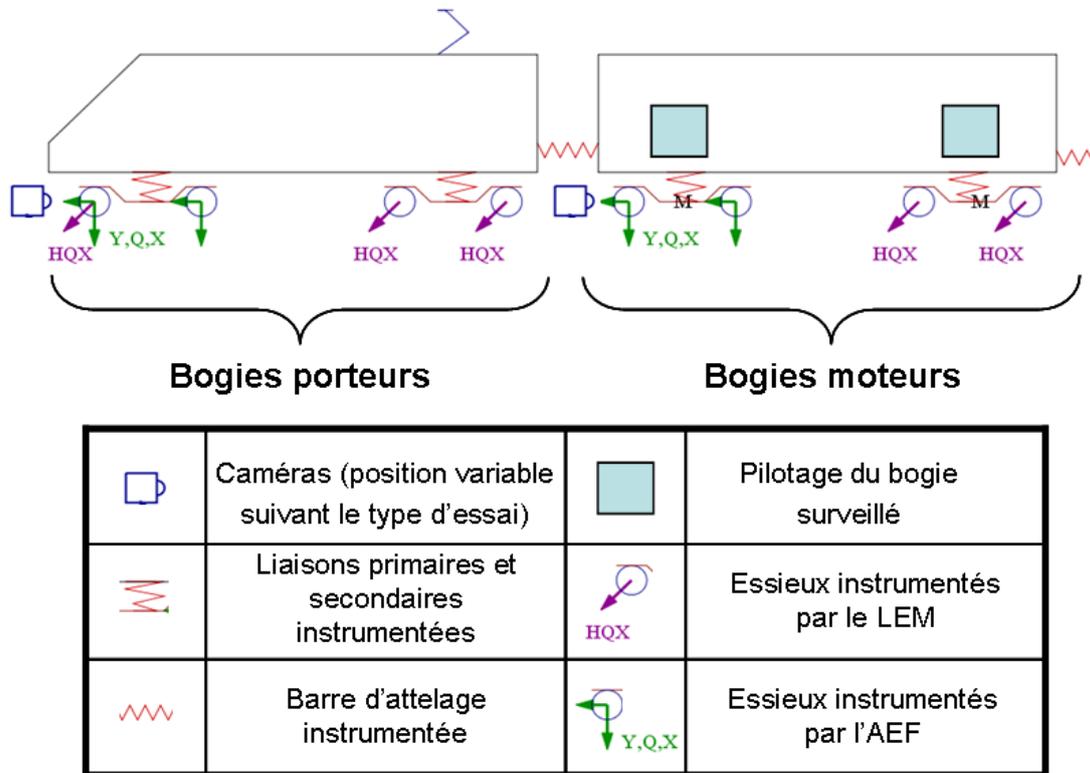


Figure IV.1-9 : Récapitulatif de l'instrumentation embarquée sur le train d'essai

Le train ainsi instrumenté est alors mis en circulation sur les zones de squats les plus importantes du réseau telle que celle de Bussy-St-Georges où ont été faites les expertises tribologiques présentées au **Chapitre II**. Il reste à établir quels types de circulations doivent être effectués au cours de l'essai.

IV.2 Organisation des circulations d'essais

Le but de l'essai est de faire circuler le train instrumenté dans les conditions les plus représentatives possible de la réalité du trafic en termes de conditions climatiques, de niveau de chargement, de vitesse et d'accélération. Afin de dévoiler un éventuel comportement critique du système train-voie, l'essai a été organisé pour balayer le maximum de combinaisons de ces paramètres au cours des 6 nuits d'essais.

IV.2.1 Variation de l'effort vertical

Sur le réseau RATP [RAT 10], les zones concernées par le squat sont excentrées, mais desservent des sites touristiques et commerciaux attractifs. Ainsi, en consultant les historiques de fréquentation, on observe que si une circulation normale en 2009 était de l'ordre de 2 à 3 personnes/m², en période de pointe l'affluence pouvait atteindre les 6 personnes/m². Ces fortes affluences engendrent une augmentation non négligeable de l'ordre de 30% de la charge à l'essieu. L'étude bibliographique ne permet pas de distinguer lequel de ces cas de charge est plus pénalisant que les autres dans le cadre de l'amorçage du squat. Il a donc été décidé de tester des circulations simulant 0, 3 et 6 personnes/m² durant les nuits d'essais.

Pour cela, les voitures instrumentées ont été chargées artificiellement à l'aide de masses (ou gueuses) de 20kg distribuées uniformément le long des plateformes constituant les 2 étages du train afin de respecter au mieux, à la fois les masses totales et les positions des centres de gravité des voitures (**Figure IV.2-1**) [SZC 11].

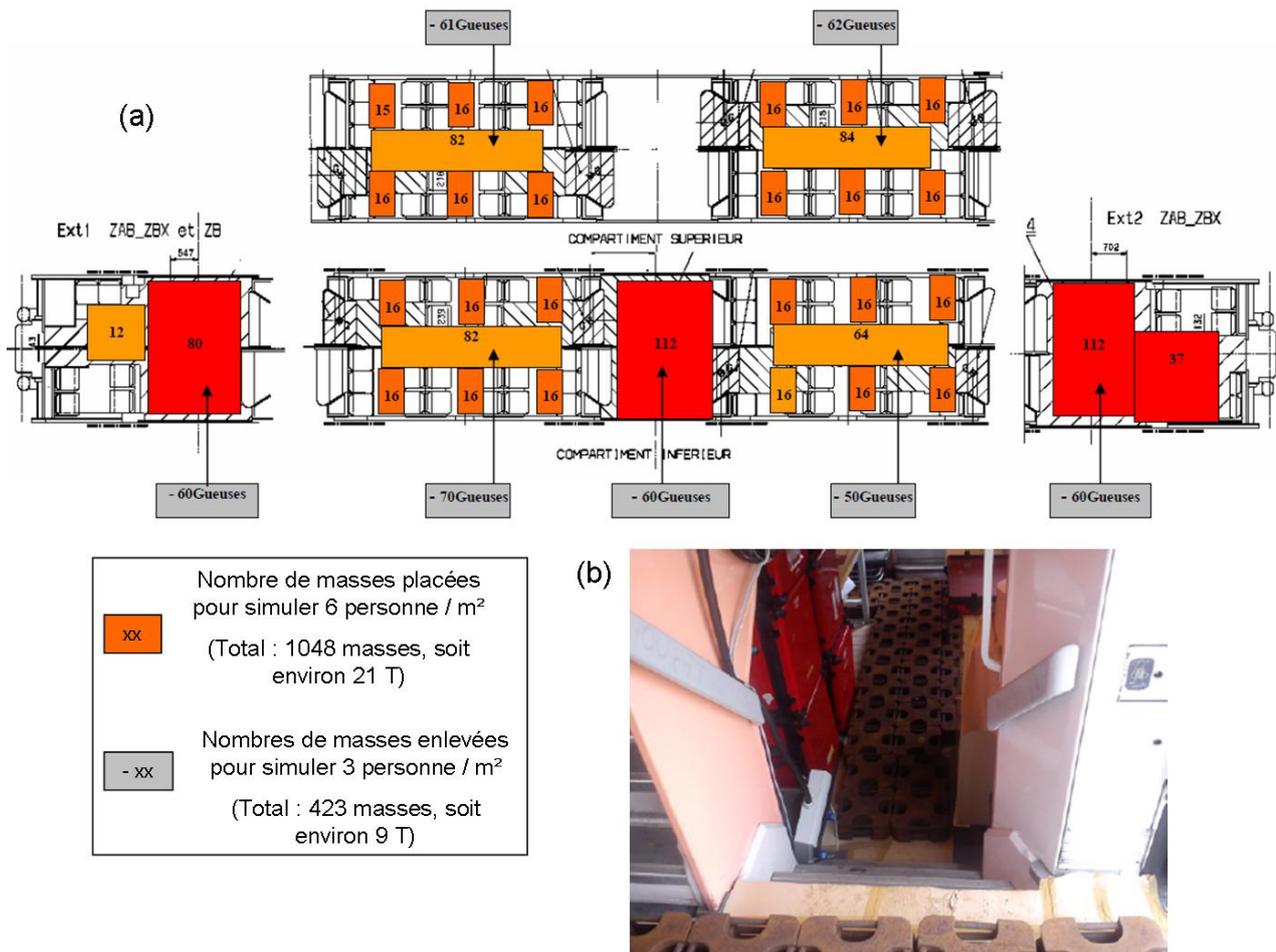


Figure IV.2-1 : (a) Diagramme de chargement de la voiture motrice, (b) Image du chargement réel

IV.2.2 Variation de l'adhérence roue-rail

Les zones de squats sont situées en extérieur. Le rail y est donc soumis aux intempéries et à diverses pollutions susceptibles de modifier les conditions d'adhérence roue/rail. Un système d'arrosage a donc été placé au niveau du premier bogie moteur et activé sur certaines circulations pour simuler la pluie et la perte d'adhérence qui en résulte.

Certaines circulations ayant eu lieu sous la pluie, l'impact d'un arrosage plus uniforme et plus proche des conditions réelles a également pu être analysé.

IV.2.3 Variation de la vitesse et de l'accélération du train

Un essai préliminaire a également été mis en place afin de déterminer quels profils de vitesses du train devaient être appliqués dans les zones de squats.

IV.2.3.1 Présentation de l'essai préliminaire

La vitesse de circulation d'un train MI2N, en exploitation classique, a été enregistrée sur différentes zones de la ligne A du RER. Les zones sélectionnées correspondent à des alignements développant ou non du squat. Finalement, l'opération a duré de janvier à juin 2011 et a permis d'enregistrer plusieurs centaines de profils de vitesse. Ces relevés permettent alors de réaliser une étude statistique sur les circulations dans les zones de squats.

IV.2.3.2 Résultats

Par rapport aux courbes théoriques de vitesse de circulation sur le réseau (**Figure IV.2-2**, courbe verte), les résultats de cet essai montrent que la vitesse limite de 120 km/h est respectée, il n'y a donc pas de survitesse à proprement dit.

Cependant, dans les zones de squats, on remarque que la vitesse moyenne des trains (courbe bleue) est supérieure de 5 à 10 km/h à la vitesse théorique. L'écart tendant à augmenter au cours de la circulation, le taux d'accélération appliqué est plus fort dans la réalité qu'en théorie. Ce constat ne s'applique pas seulement à la valeur moyenne des vitesses mesurées, mais est le même pour la majorité des trains, les traits rouges représentant l'intervalle dans lequel se trouve environ 70% des trains en supposant une distribution gaussienne des vitesses. De manière générale, le train a donc circulé plus vite que prévu dans la zone de squats et ce, pour différents conducteurs et différentes conditions climatiques.

De plus, sur la courbe théorique ainsi que sur les courbes mesurées, on observe une légère rupture de pente aux alentours de la moitié de la zone de squats. La traction semble être légèrement réduite à partir de ce point. Ainsi, cette zone de squats est plutôt située en fin d'accélération, dans une période transitoire entre deux régimes de tractions (**Figure IV.2-2(b)**), l'un de mise en mouvement du véhicule et l'autre de circulation à vitesse constante.

En conclusion, les circulations réelles montrent que les taux d'accélération dans les zones de squats sont plus élevés qu'en théorie et varient au cours du temps.

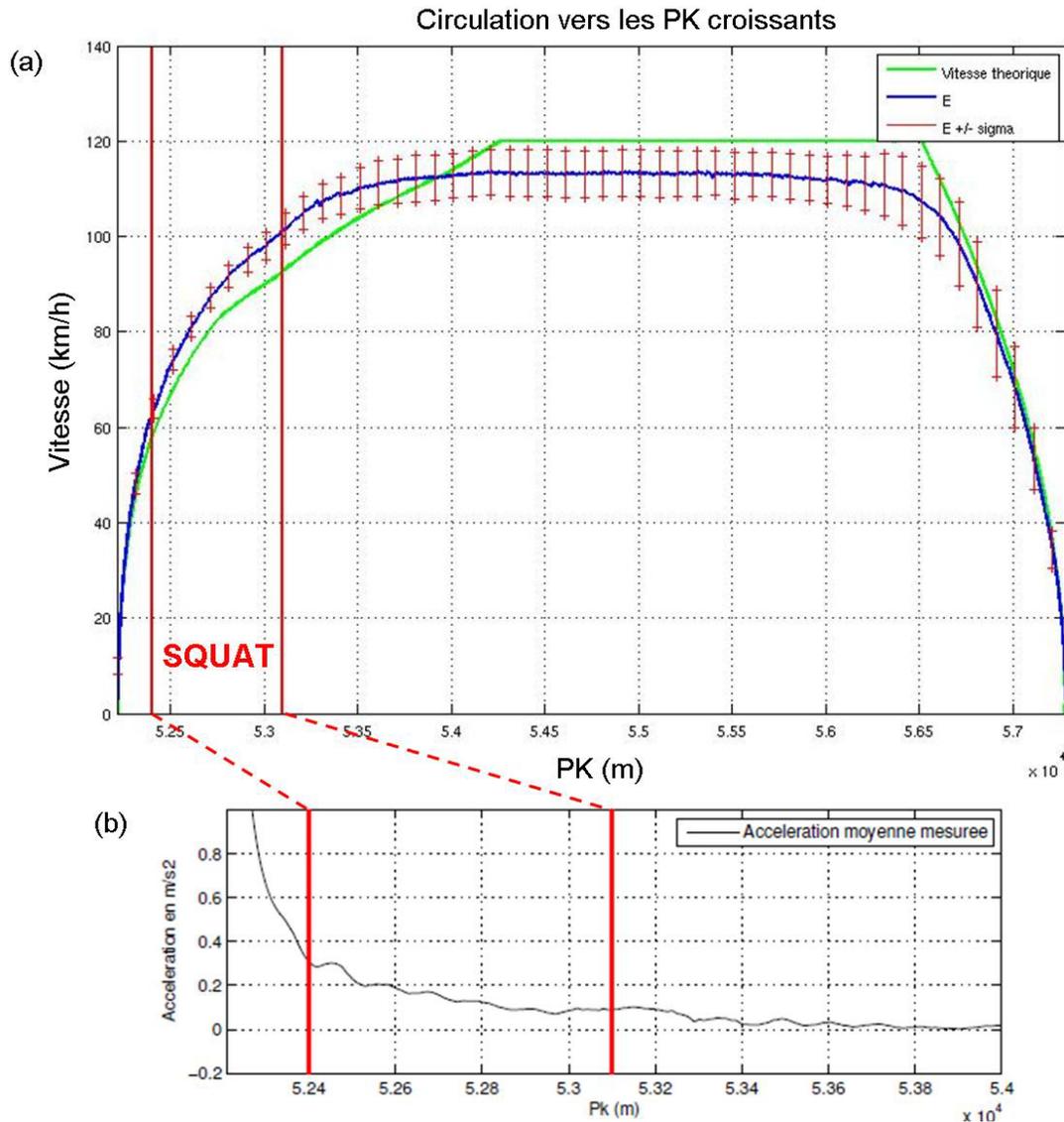


Figure IV.2-2 : (a) Courbes de vitesse et (b) accélérations des trains mesurées en voie

Pour reproduire ce phénomène, on testera donc dans l'essai Interface Roue/Rail, différents niveaux de vitesse, combinés à différents niveaux de consigne de traction dans les zones de squats (**Figure IV.2-3**). On espère ainsi balayer suffisamment de paramètres pour potentiellement mettre en lumière un comportement dynamique critique du train dans certaines conditions, tout en dissociant bien les paramètres de vitesses et d'accélération.

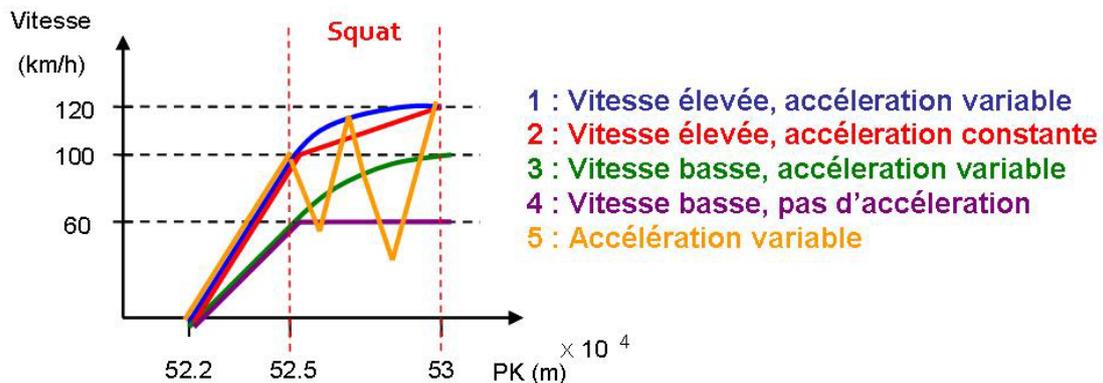


Figure IV.2-3 : Exemple de profils de vitesse testée pour une zone de squat donnée

IV.2.4 Bilan : Planning des circulations d'essais hors exploitation

Au final, 44 allers-retours ont été effectués entre les stations de Bussy-St-Georges et Marne-La-Vallée-Chessy au cours des nuits d'essais. Le détail des paramètres testés pour chaque circulation est donné dans le **Tableau IV.2-1**.

De manière générale, les 5 premières marches de chaque nuit ont été effectuées de manière à reproduire les mêmes types de courbes de vitesse mais à différents niveaux de chargement ou d'arrosage (excepté pour la nuit 34-4, où l'arrosage n'ayant pas fonctionné, il a été décidé d'effectuer d'autres profils de vitesses). Suite à ces 5 circulations et si la disponibilité de la zone d'essais le permettait, des circulations supplémentaires ont été testées pour alimenter le plus possible notre base de données, y compris pour des comportements « extrêmes ».

Semaine - Nuit		33-3	33-4	34-1	34-2	34-3	34-4
Chargement (personne/m ²)		6	6	3	0	0	0
Arrosage		Inactif	Actif	Inactif	Inactif	Inactif	Défectueux
Position caméra		Porteur	Porteur	Moteur	Moteur	Moteur	Moteur
Circulation n°1	Vitesse*	120	120	120	120	120	120
	Traction*	Auto	Auto	Auto	Auto	Auto	Auto
Circulation n°2	Vitesse	120	120	120	120	120	120
	Traction	4	4	4	4	4	4
Circulation n°3	Vitesse	120	120	120	120	120	120
	Traction	4 → 3	4 → 3	4 → 3	4 → 3	4 → 3	4 → 3
Circulation n°4	Vitesse	100	100	100	100	100	100
	Traction	3	3	3	3	3	Auto
Circulation n°5	Vitesse	100	100	100	100	100	100
	Traction	3 → 2	3 → 2	3 → 2	3 → 2	3 → 2	Freinage
Circulation n°6	Vitesse	100	120	120	120	120	120
	Traction	3	4 → 2	Multi	Multi	4	Multi
Circulation n°7	Vitesse	120	60	120	120	120	90
	Traction	4	4 → 0	4	4	4 → 3	Auto
Circulation n°8	Vitesse		120		60		
	Traction		Multi		4 → 0		

Tableau IV.2-1 : Récapitulatif des circulations voie 1 réalisées sur la zone d'essai

* Vitesse : Valeur de vitesse recherchée en fin de phase d'accélération

* Traction : Position de la commande manipulée par le conducteur lors du passage sur la zone de squats :

- 0 à 4 correspondent aux positions de traction en pilotage manuel, le niveau 4 correspondant à la traction la plus élevée, le niveau 0 à une traction nulle (également appelé passage sur l'erre¹⁹).
- « Auto » correspond à une gestion auto-régulée du niveau de traction pour une vitesse imposée au train.
- « Multi » correspond à une circulation où le niveau de traction est variable, avec des coupures et des reprises de traction multiples.
- « Freinage » traduit un freinage dans la zone de squats

¹⁹ L'erre correspond à la vitesse résiduelle lorsqu'il n'y a plus de traction.

IV.3 Résultats de l'essai

Au final, 171 voies de mesures ont été enregistrées au cours de 44 allers-retours entre les deux stations de Bussy-St-Georges et Marne-La-Vallée-Chessy. Pour permettre l'exploitation de ce volume important de données, les mesures ont d'abord été reformatées, synchronisées et validées dans des situations où les bilans d'efforts au niveau des bogies sont relativement simples à établir. Le détail de cette validation des signaux est exposé en Annexe D. La cohérence des mesures établie, l'interprétation de l'évolution des efforts pour des circulations complexes où plusieurs paramètres interagissent (vitesse, géométrie de la voie, régime de traction...) est rendue possible. Pour faciliter cette interprétation, un calcul sur un logiciel de dynamique ferroviaire a été effectué pour servir de référence et rappeler le comportement classiquement attendu d'un train dans un alignement [AYA 00, AYA 03].

Comme évoquée précédemment (**Figure II.2-1**), dans ce chapitre, la description des résultats d'essais se concentrera principalement sur une zone de squats du réseau RATP situé sur la voie opposée à celle étudiée au **Chapitre II**. Pour rappel (**Tableau II.2-1**), cette zone à proximité de la station de Bussy-St-Georges est située entre les points kilométriques (PK) 52500 et 53000, dans une portion de voie en alignement et une légère rampe (13 pour mille). L'exploitation des trains dans cette zone est caractérisée par une forte accélération. Le choix de cette zone au détriment de celle d'où proviennent les échantillons étudiés au **Chapitre II**, s'explique par le fait que l'instrumentation oblige à dégrader la capacité de freinage du train. La capacité d'accélération de la rame d'essai est par contre identique à celle des rames en circulations. De plus, la zone sélectionnée est également suivie depuis fin 2009 dans le cadre de visites périodiques sur site (voir **Chapitre V**).

La figure suivante (**Figure IV.3-1**) définit les notations des efforts utilisées dans cette partie. Les efforts sont notés « DN_R » avec D la direction de l'effort étudié (Q, Y ou X), N le numéro de l'essieu étudié et R désignant la roue droite ou gauche (noté respectivement RD et RG).

De plus, les essais sont désignés suivant la nomenclature « SS-J-N », avec SS le numéro de la semaine, J le numéro de la nuit de la semaine concernée et N le numéro de la Nième circulation de la nuit concernée.

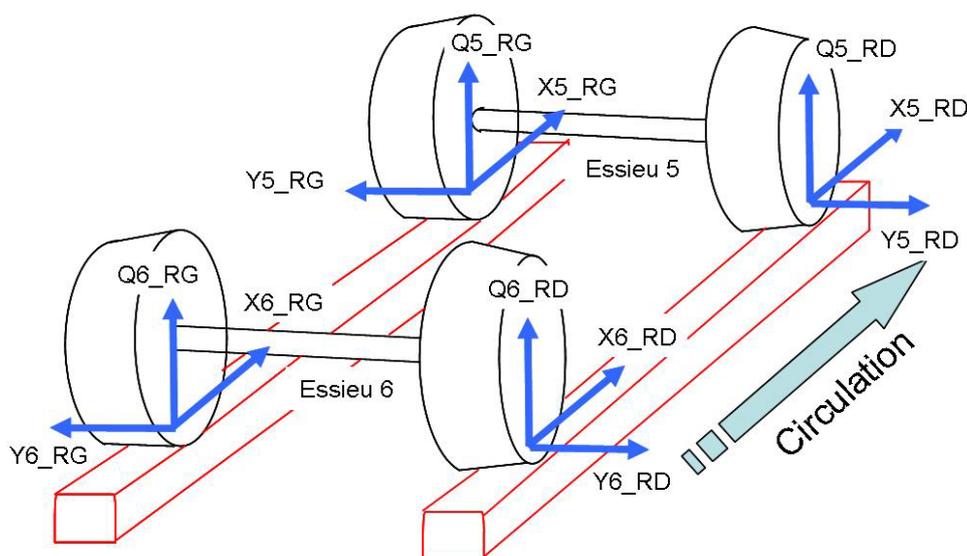


Figure IV.3-1 : Définition et orientation des efforts mesurés sur le bogie 3

IV.3.1 Calcul de référence des conditions de contact et du comportement dynamique du train

Afin de comparer les mesures réalisées durant l'essai avec le comportement attendu classiquement en dynamique ferroviaire, la circulation d'un train dans la zone d'étude de Bussy-St-Georges a été simulée dans un code de calcul ferroviaire interne à la RATP. Une attention particulière a été portée sur différents éléments de la simulation pour être le plus proche possible de l'essai :

- La géométrie réelle du tracé a été modélisée, comprenant à la fois la géométrie théorique et les variations de pose réelles (dévers, sous écartement...) mesurées par les appareils de contrôle du réseau.
- Un modèle de train MI2N à vide (0 personne/m²) a été créé, respectant les différents éléments de suspensions et le dimensionnement de la motorisation.
- La courbe de vitesse (**Figure IV.3-2(d)**) appliquée au train est issue d'une des circulations effectuées durant l'essai. Elle est caractérisée par une accélération jusqu'à 30km/h, puis par un passage sur l'erre²⁰ pendant une dizaine de secondes et enfin une reprise de la traction jusqu'à 120km/h

Les résultats de la simulation (**Figure IV.3-2**) sur le premier bogie moteur montrent pour un modèle MI2N dans un alignement avec une légère rampe que :

- Les efforts verticaux Q varient en moyenne sur les 4 roues entre 70kN et 75kN. La charge est répartie uniformément entre les deux files de rails, mais on note un cabrage « avant / arrière » du bogie (c'est-à-dire un déchargement de l'essieu avant au profit de l'essieu arrière) lors des reprises des tractions. Les variations des signaux autour de leur valeur moyenne s'expliquent par la prise en compte du tracé réel de la voie dans le calcul, en particulier des défauts liés au tracé vertical.
- Les efforts transversaux Y ont une valeur absolue proche de 1kN excepté lors du passage dans des zones de fortes variations du tracé horizontale (notamment dans les appareils de voie (ou « aiguillages »)). Pour un même essieu, ils ont également un signe opposé entre les roues droite et gauche.
- Les efforts longitudinaux X sont nuls lors du passage sur l'erre (il n'y a pas de glissement résiduel des roues). En phase de traction, ils oscillent en opposition de phase pour les deux roues d'un même essieu. La somme de ces 4 efforts aux jantes, correspond au couple moteur appliqué (**I.1.2.2**). Les fortes variations de ces efforts correspondent à des changements rapides de positions de contact (et donc à une adaptation du glissement de la roue) aux variations du tracé réel.

Le phénomène d'oscillations observé sur les efforts longitudinaux correspond à un couplage du mouvement d'avance de l'essieu avec un mouvement transversal, appelé lacet. Lorsqu'un essieu se déporte du milieu de la voie, le rayon de roulement n'est plus le même à droite et à gauche. La vitesse d'avance des points de contact est alors différente et l'essieu prend un angle de lacet (rotation autour de l'axe vertical définit dans la **Figure I.1-5**). Il se déporte alors entre les deux files de rails jusqu'à se trouver dans la position inverse. L'essieu suit ainsi ce mouvement périodique et s'auto-centre en permanence.

²⁰ Pour permettre le recalage des signaux AEF en début de circulation, un passage sur l'erre (ou coupure de traction) dans un alignement à plat a été effectué pour chaque circulation aux alentours de 30km/h et explique le « plat » observé sur les courbes de vitesse.

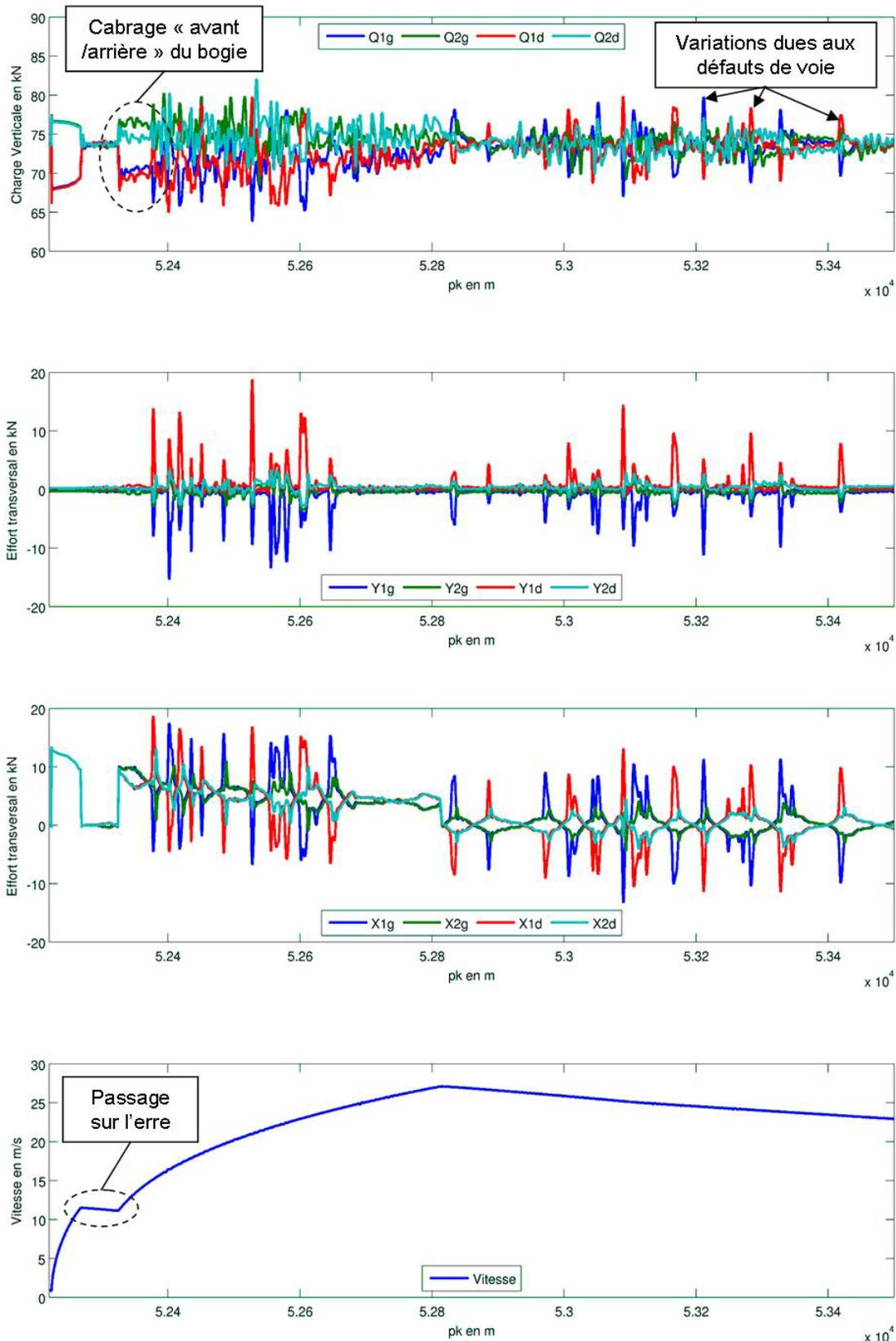


Figure IV.3-2 : Résultats de simulation de dynamique ferroviaire pour un véhicule MI2N en sortie de la gare de Bussy-St-Georges

Les résultats de ce calcul servant de référence, il est alors possible d'interpréter les différences constatées avec les mesures réalisées.

IV.3.2 Etude des glissements macroscopiques de la roue sur le rail

L'étude des glissements a été effectuée, de manière indirecte, en étudiant le comportement du système anti-patinage. Pour rappel, le rôle de l'anti-patineur est d'éviter un glissement macroscopique de la roue sur le rail en diminuant la consigne de traction lorsque la valeur du taux de glissement devient trop importante. Le taux de glissement est défini par la relation :

$$v_x = \frac{V_{train} - V_{roue}}{V_{train}} = \frac{V_{train} - \omega R}{V_{train}} \quad (4.1)$$

Avec :

- $V_{roue} = \omega R$, la vitesse linéaire de la roue avec R le rayon de roulement et ω la vitesse de rotation de la roue
- V_{train} , la vitesse d'avance du train

L'algorithme de l'anti-patineur du véhicule MI2N [LAC 12] est prévu pour corriger le niveau de traction demandée lorsque la différence entre la vitesse du train et la vitesse de la roue devient supérieure à 1,5 km/h, ce qui correspond à environ 2% de glissement pour une circulation à 80 km/h. Ainsi, si le système d'anti-patinage n'agit pas, le glissement roue/rail peut être considéré inférieur à cette valeur critique.

L'action de l'anti-patineur est suivie en étudiant la différence entre les intensités des courants d'entrée et de sortie surveillées durant l'essai (**Figure IV.3-3**). Ainsi sur l'ensemble des circulations réalisées, on observe que les glissements les plus importants ont lieu principalement en début d'accélération et très rarement au sein de la zone de squats qui se situe plutôt en fin de phase de traction. La zone de squats est donc peu sujette à des taux de glissements roue/rail élevés, et donc indirectement, aux élévations importantes de températures dues à ceux-ci (**I.2.2**). Ce résultat conforte donc l'hypothèse initiale consistant à écarter la formation thermique de phase blanche et de privilégier principalement une origine mécanique dans le cas de la zone de squats de Bussy-St-Georges (**III.2.2**).

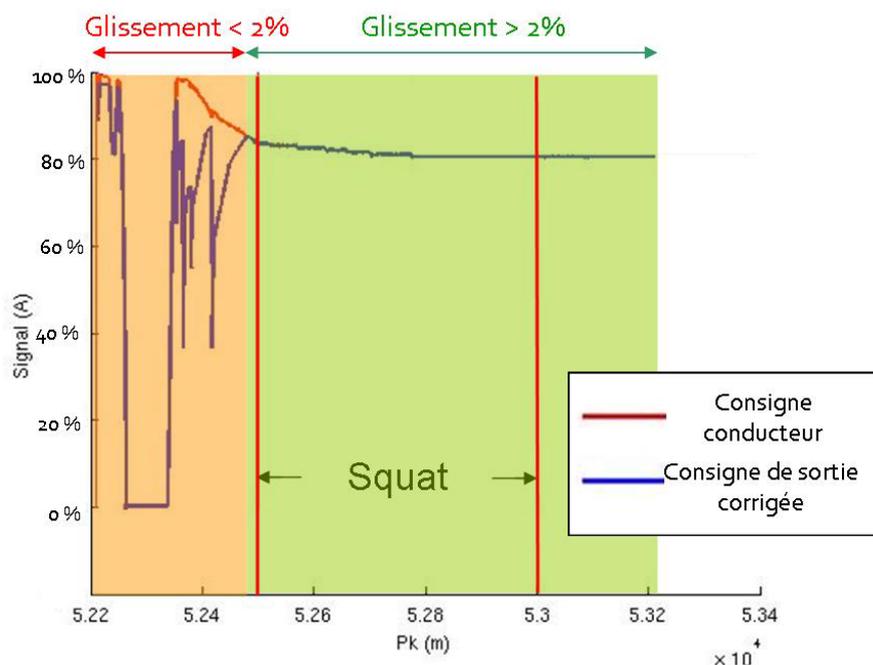


Figure IV.3-3 : Etude du patinage de la roue dans la zone d'essais (Circulation vers les PK croissants)

IV.3.3 Etude des efforts moyens de contact par roue

Pour valider la possibilité d'une formation mécanique de la phase blanche dans la zone étudiée, l'étude des niveaux d'efforts au contact est indispensable pour estimer les conditions de pression et de cisaillement subies par le rail.

IV.3.3.1 Les efforts verticaux Q :

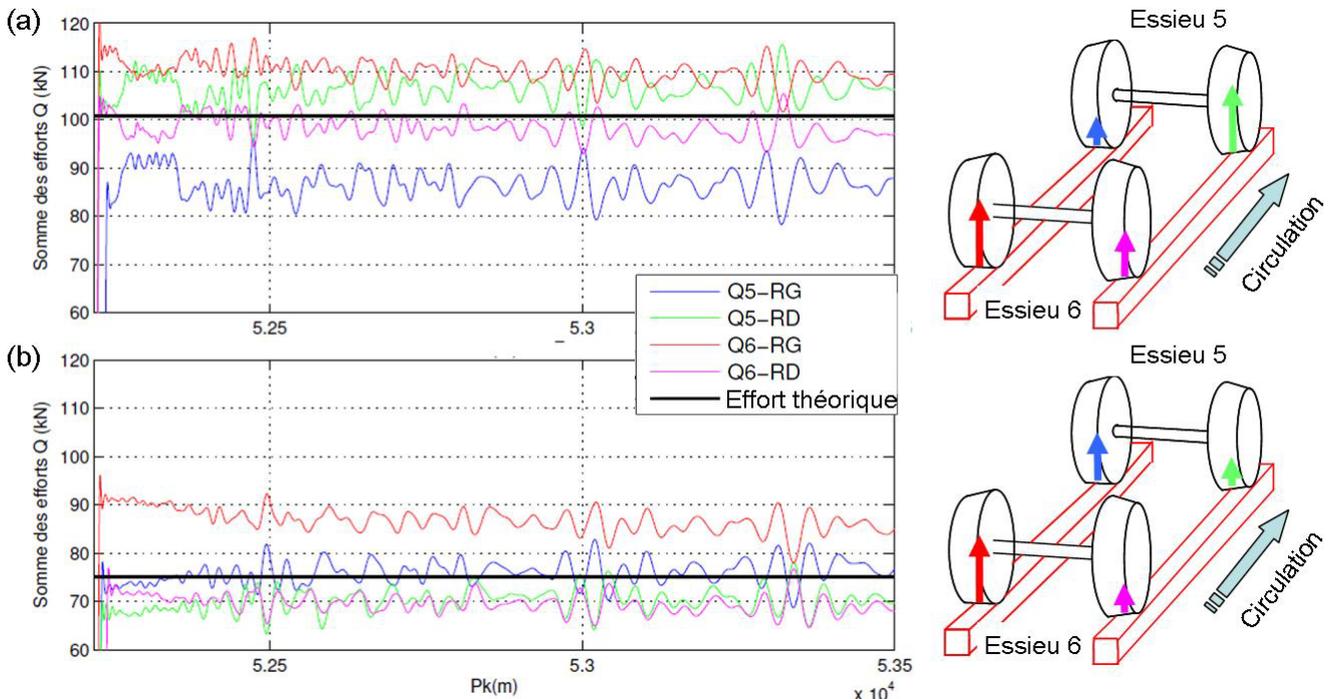


Figure IV.3-4 : Répartition par roue des efforts Q (circulation vers les Pk croissants)
(a) 33-3-2 : 6 personne /m², (b) 34-2-1 : 0 personne /m²

L'étude des forces verticales Q sur le bogie 3 (bogie moteur) (**Figure IV.3-4**) montre que la répartition de charges n'est pas équilibrée sur les 4 roues du bogie, et ce, quelque soit le niveau de chargement de la rame. La répartition des forces verticales varie ainsi d'une circulation à l'autre (et également entre deux circulations avec un niveau de chargement similaire) et différents cas de reports de charge sont observés suivant les circulations. Par exemple :

- La circulation 33-3-2 (**Figure IV.3-4(a)**) est caractérisée par une répartition croisée (Q5-RD, Q6-RG) des efforts les plus importants (à laquelle se combine une surcharge sur l'essieu arrière 6),
- La circulation 34-2-1 (**Figure IV.3-4(b)**) s'accompagne d'une répartition droite-gauche déséquilibrée des efforts verticaux (Q5-RG, Q6-RG). Dans cet exemple, la surcharge a lieu du côté gauche du bogie dans le sens de circulation.

Par rapport à une répartition théorique de la masse du train uniformément répartie sur chacune des roues (courbes noires), on trouve en réalité un écart de l'ordre de plus ou moins 10-15 kN, ce qui représente un écart maximum de 15% pour les circulations les plus chargées et de 20% pour les circulations non chargées. Si cette différence ne paraît pas alarmante en termes de sûreté ferroviaire, cet écart est suffisamment notable pour être pris en compte dans l'étude de la fatigue de contact et de la formation des squats. Ce déséquilibre peut s'expliquer par une répartition des masses non uniformes au niveau de la caisse et/ou une légère dissymétrie dans le tarage des différentes suspensions primaires et secondaires.

IV.3.3.2 Les efforts transversaux Y :

Les mesures réalisées sur les efforts transversaux Y appliqués au niveau des roues d'un bogie moteur montrent plusieurs différences avec les efforts calculés.

Tous les efforts sont négatifs. Les roues « tirent » le rail vers l'intérieur de la voie. De plus, en termes de valeurs absolues, les efforts sont plus importants que ceux calculés. Ils augmentent progressivement au cours de la circulation, passant de 1,5kN à 3,5kN entre les PK 52000 et 53000.

Ces valeurs sont surprenantes par rapport au calcul (IV.3.1) car les efforts ne s'annulent pas à l'échelle du bogie. Elles pourraient être cohérentes avec un spin (rotation de la roue autour de l'axe vertical) non nul sur les 4 roues. Cependant à ce stade, les éléments ne sont pas suffisants pour comprendre l'inscription du bogie dans la voie.

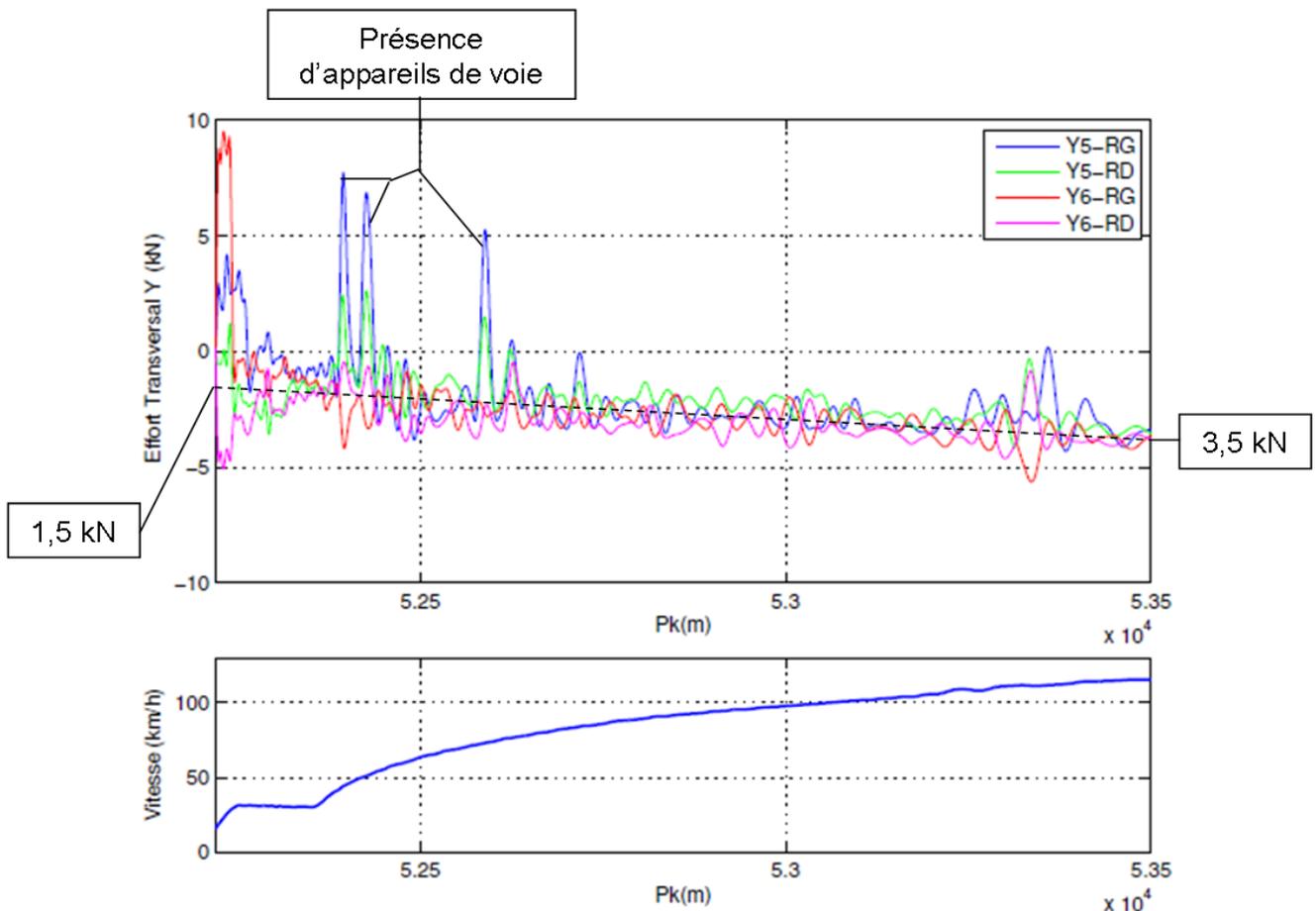


Figure IV.3-5 : Répartition par roue des efforts Y pour la circulation 34-2-2 (circulation vers les Pk croissants)

IV.3.3.3 Les efforts longitudinaux X :

- Exemple de répartition des efforts X sur une circulation d'essai :

La répartition des efforts X par roue au sein des bogies moteurs (**Figure IV.3-6**) est également différente de celle calculée. En effet, si la somme des efforts longitudinaux sur l'essieu correspond bien à l'effort mesuré au niveau de la bielle (et donc au couple moteur appliqué), la répartition par roue n'est pas symétrique. Le problème se pose aussi bien sur le bogie 3 (mesuré par l'AEF) que sur le bogie 4 (mesuré par le LEM) à la fois. Il est également présent lors de la circulation sur l'erre (avec une différence d'environ 8kN dans le cas de la marche 34-2-2) et semble aggravé en traction (avec une différence d'environ 18kN dans le cas de la marche 34-2-2). En conséquence, les 4 roues gauches supportent la majorité de l'effort de traction.

Par exemple, pour la circulation 34-2-2, par rapport à la courbe théorique (courbe noire), pris comme l'effort à la bielle divisé par 2, on observe au niveau du repère 1 que :

- La roue droite de l'essieu 6 voit en moyenne 50% d'effort en moins
- La roue gauche de l'essieu 6 voit en moyenne 50% d'effort de plus
- La roue droite de l'essieu 5 voit en moyenne 110% d'effort en moins
- La roue gauche de l'essieu 5 voit en moyenne 110% d'effort de plus

Physiquement, pour cette circulation d'essai, la roue droite de l'essieu 5 (courbe verte) subit donc un effort de freinage qui est compensé par la roue gauche (courbe bleue). Ainsi, la roue gauche applique sur le rail un effort plus de deux fois supérieur à la valeur attendue.

On observe également que le déséquilibre de traction (l'écart entre les courbes des efforts vus par les roues d'un même essieu) est plus important pour les essieux aux extrémités de la voiture. Sur le bogie 3, l'essieu 5 est plus déséquilibré que l'essieu 6 et sur le bogie 4 celui de l'essieu 8 est plus élevé que sur l'essieu 7. Le déséquilibre n'est donc pas lié à sa position en tête ou en queue par rapport au bogie.

Enfin, sur le bogie 3 (**Figure IV.3-6(a)**), au niveau du point kilométrique (PK) 53400, les efforts mesurés au niveau des roues gauches deviennent brièvement inférieurs à ceux mesurés sur les roues droites. Ce comportement est observé pour d'autres marches au sein de la zone de squat entre les PK 52500 et 53000. Cette inversion d'efforts s'accompagne d'une inversion de glissement pour la roue droite, susceptible d'être à l'origine des inversions du fibrage longitudinal observées lors des observations tribologiques au niveau du motif périodique présent sur la bande de roulement (**Figure II.2-8** et **Figure II.2-11**).

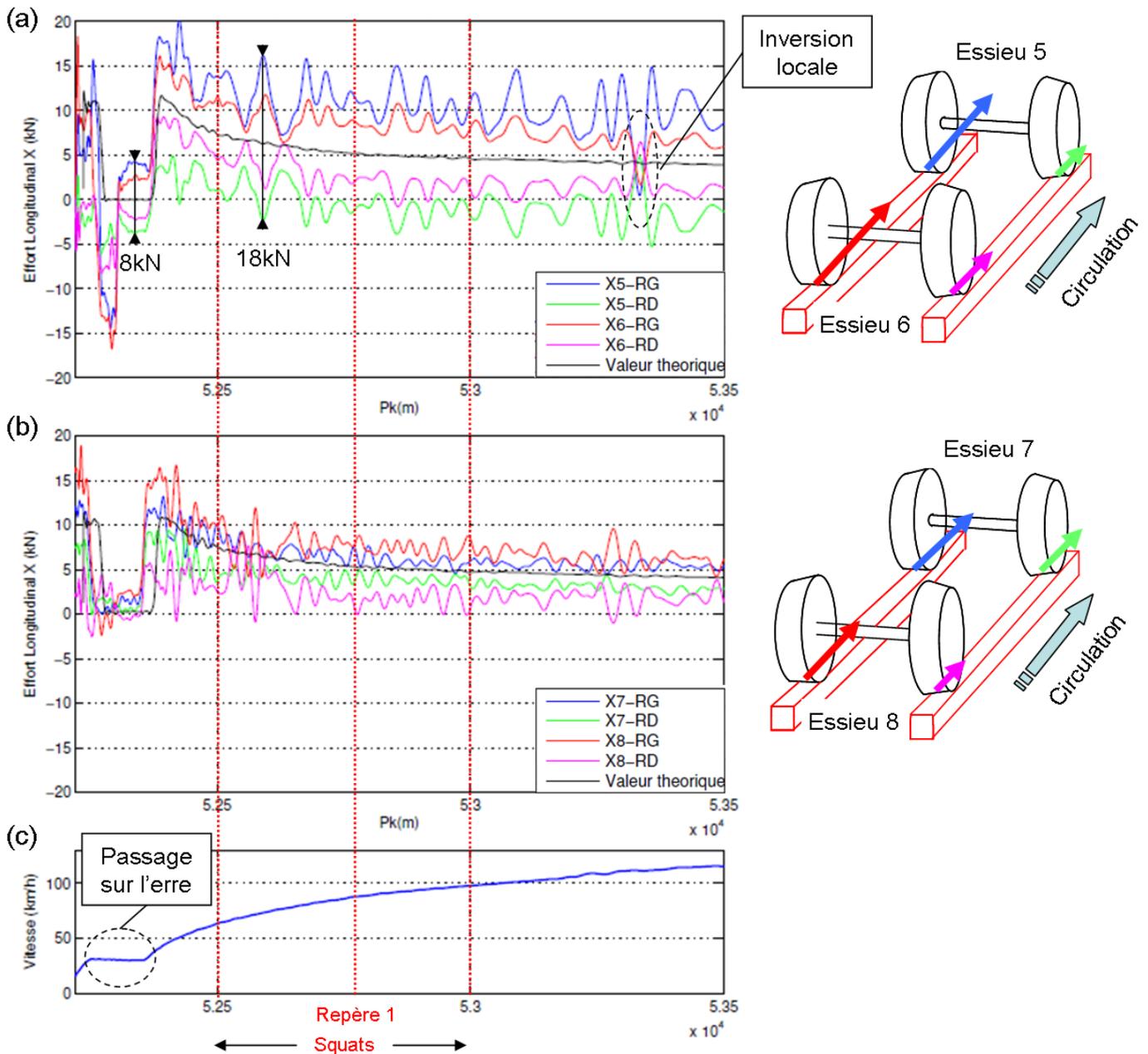


Figure IV.3-6 : Répartition par roue des efforts longitudinaux X pour le bogie 3 (a) et le bogie 4 (b) pour la circulation 34-2-10. (Circulation vers les PK croissants)

Le déséquilibre d'effort longitudinal entre les roues droite et gauche d'un même essieu est observé pour l'ensemble des marches, mais à des niveaux différents d'amplitude.

- Généralisation de la répartition des efforts X sur l'ensemble des circulations :

Afin d'estimer la fréquence d'occurrence et les amplitudes de cette situation de traction dissymétrique pour les différentes circulations réalisées dans notre zone d'étude, un indicateur de suivi a été construit. Ainsi, pour chaque essieu sur les 44 circulations, on calcule la valeur du rapport entre les PK 52500 et 53200 :

$$Deseq_i X = \frac{Xi_RG - Xi_RD}{Xi_RG + Xi_RD} \quad (4.2)$$

Avec :

- $Deseq_i X$: Pourcentage de déséquilibre d'effort X sur l'ième essieu à un PK donné.
- Xi_RG : Effort longitudinal sur la roue gauche
- Xi_RD : Effort longitudinal sur la roue droite

Cette quantité représente l'effort de traction supplémentaire supporté par la roue gauche par rapport à une situation de traction équilibrée. Lorsque cet indicateur est proche de 0, la répartition des efforts longitudinaux sur les roues droite et gauche est donc équilibrée. Par exemple, $Deseq_5 X = 0,5$ pour un effort de traction total de 15kN sur l'essieu signifie que la roue gauche applique en réalité un effort de 11,25 kN ($= 7,5 + 0,5 \times 7,5$).

Ce paramètre est calculé pour les essieux moteurs sur l'ensemble des circulations d'essais durant lesquelles la traction est maintenue entre les PK 52500 et 53200. Le **Tableau IV.3-1** présente la moyenne et l'écart-type de cet indicateur pour l'essieu 5. Il est classé par ordre croissant de la valeur moyenne.

Numéro circulations	Charge	Moyenne	Ecart-type	Numéro circulations	Charge	Moyenne	Ecart-type
34-4-7	0	-0.1809	0.1778	34-2-7	0	0.7377	0.3522
34-3-3	0	-0.0568	0.3222	34-4-4	0	0.7493	0.2307
33-3-1	6	0.1000	0.9814	33-3-3	6	0.8357	0.3695
33-4-2	6	0.3373	0.2327	34-3-4	0	0.8950	0.2300
33-4-3	6	0.3641	0.2435	34-4-1	0	0.9490	0.3498
33-3-5	6	0.4489	0.4545	33-4-6	6	1.0057	0.3278
34-1-1	3	0.5018	0.2816	34-1-7	3	1.0240	0.1577
34-4-2	0	0.5297	0.2138	34-1-2	3	1.0534	0.3264
33-4-1	6	0.5491	0.2972	33-3-2	6	1.0677	0.2948
34-3-5	0	0.5622	0.5019	34-2-2	0	1.1106	0.3139
34-4-3	0	0.5643	0.4488	33-3-4	6	1.1113	0.4984
33-4-5	6	0.6632	0.3380	34-2-4	0	1.1347	0.3659
33-4-4	6	0.6656	0.2790	34-2-3	0	1.1755	0.3357
34-3-1	0	0.6791	0.2727	34-1-4	3	1.2486	0.3728
34-3-2	0	0.6828	0.3293	33-3-4	6	1.4591	0.5437
34-3-6	0	0.7353	0.2415	34-1-5	3	1.4607	0.5455

Tableau IV.3-1 : Moyenne et écart-type de $Deseq_5$ calculé entre les PK 52500 et 53200

Pour 27 marches (environ 85%) des circulations, la roue gauche de l'essieu 5 supporte plus de 40% d'effort supplémentaire entre les PK 52500 et 53200 par rapport à son effort nominal. Autrement dit, la roue gauche assure donc très régulièrement une grande partie de l'effort de traction total de l'essieu 5.

Bien qu'un seul train ait été instrumenté, la large variété de paramètres testés au cours de ces 44 circulations laisse supposer que l'essai est représentatif du comportement de la flotte de MI2N et que le déséquilibre des efforts longitudinaux est fréquent sur cette portion de voie pour les trains en exploitation.

IV.3.4 Facteurs d'influence sur le déséquilibre mesuré

Pour analyser le déséquilibre sur les valeurs d'efforts longitudinaux des roues droite et gauche, il est intéressant de rappeler les lois de saturation utilisées afin de calculer les efforts tangentiels dans les calculs de dynamique ferroviaire (I.2.1.2). En particulier, les modèles de Kalker [KAL 91] expriment l'effort longitudinal avant saturation, en fonction de paramètres matériaux, de la taille et de l'éclatement de l'ellipse contact ainsi que du glissement roue rail longitudinal. Après saturation, celui-ci est fonction du coefficient de frottement μ et de la charge verticale (Figure IV.3-7).

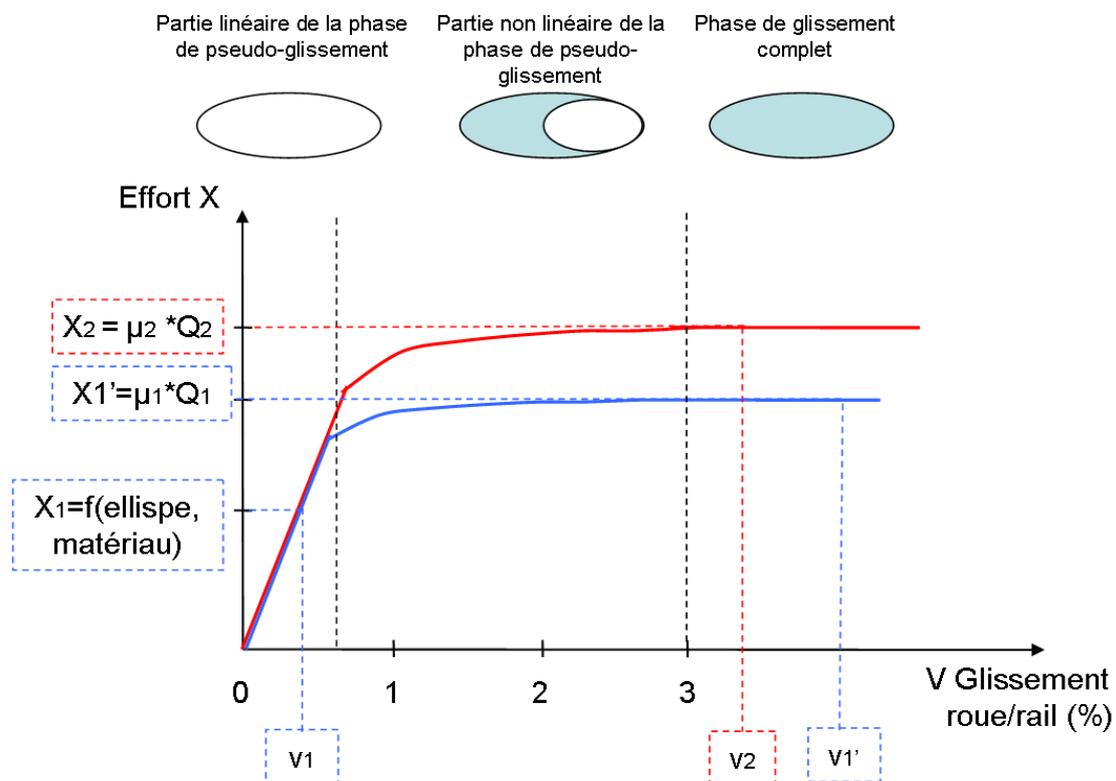


Figure IV.3-7 : Evolution de l'effort longitudinal en fonction du glissement (inspiré de [NIC 01])

Dans le cas d'un alignement comme sur Bussy-St-Georges, le contact a lieu sur la bande de roulement de la roue et le sommet du champignon du rail. La taille et l'élongation de l'ellipse de contact sont donc peu susceptibles de varier notablement. De plus, le rail est supposé posséder des propriétés mécaniques homogènes le long de la zone d'étude. Les influences potentielles de la géométrie de l'ellipse de contact et des paramètres matériaux sur la valeur de l'effort longitudinal ne sont donc pas étudiées dans cette partie.

L'objectif de cette partie est donc de juger de l'influence de la charge, du glissement roue/rail et des conditions d'adhérence sur les valeurs d'efforts longitudinales mesurées durant l'essai.

IV.3.4.1 Influence de l'effort vertical

Pour étudier l'influence de l'effort vertical sur le déséquilibre des efforts longitudinaux, les variables $Deseq_iX$ et $Deseq_iQ$ telles que définies dans la partie précédente sont calculés pour l'ensemble des essieux moteurs entre les PK 52500 et 53200.

La **Figure IV.3-8** présente l'évolution de ces populations statistiques caractérisées par leur moyenne et leur écart-type σ . Pour rappel, les axes en pointillés d'équation $x=0$ et $y=0$ représentent les situations, respectivement en Q et en X, pour lesquelles les efforts sont équilibrés entre les roues droite et gauche.

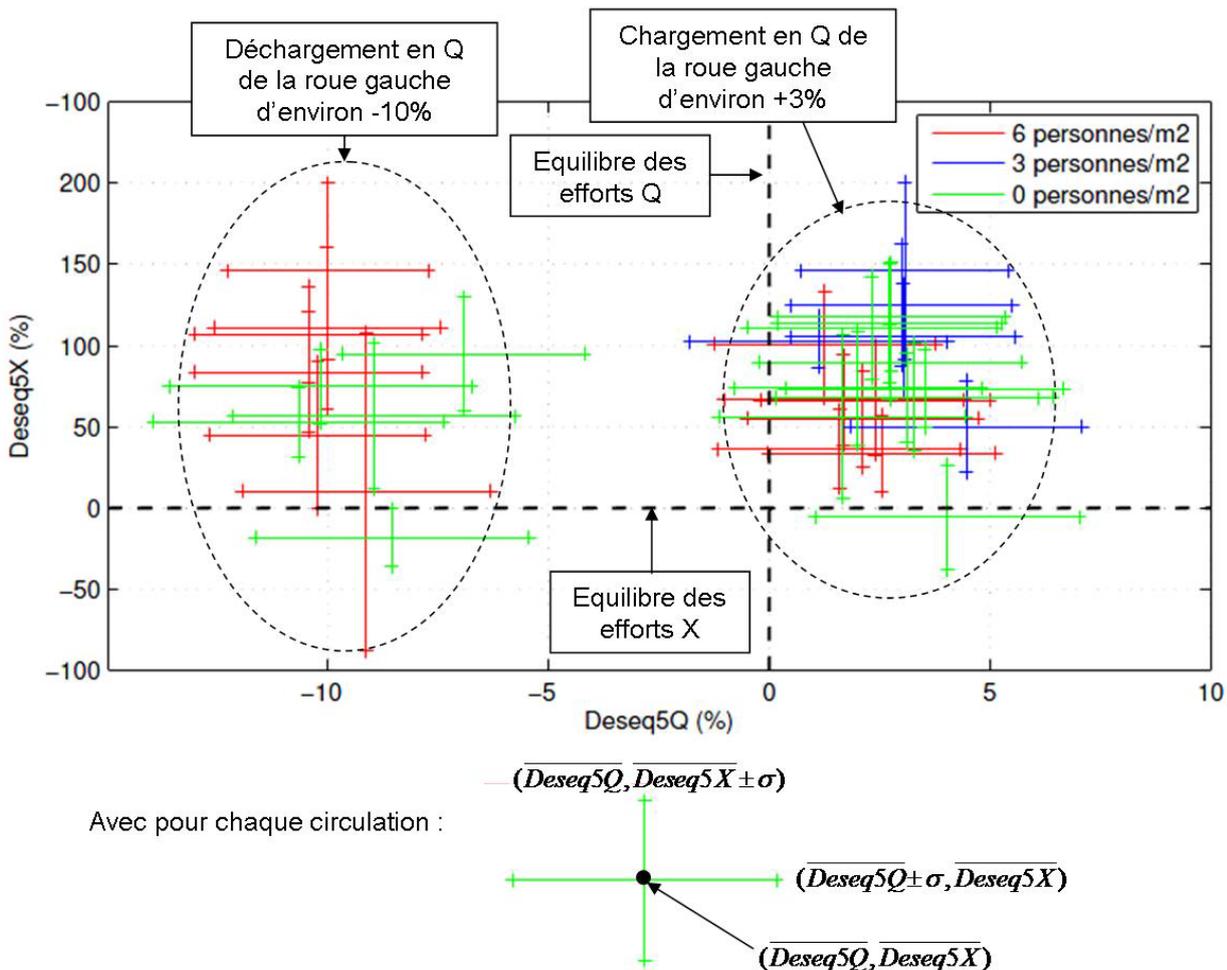


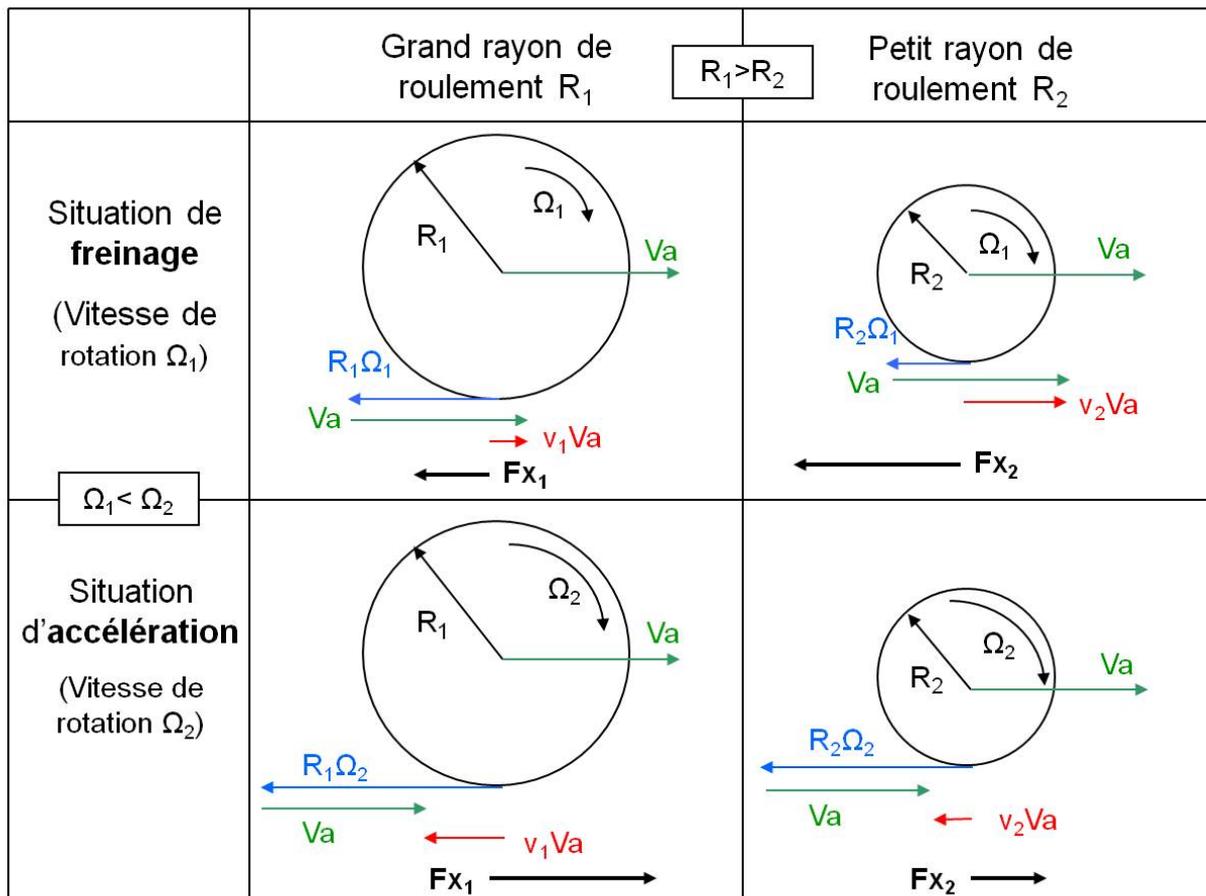
Figure IV.3-8 : Influence de la charge verticale sur le déséquilibre des efforts longitudinaux

Le déséquilibre des efforts verticaux présente donc globalement deux situations. Soit la roue gauche subit 4% d'effort supplémentaire (domaine à droite de l'axe $x=0$), soit elle est déchargée de 10% d'effort (domaine à gauche de l'axe $x=0$) par rapport à la situation nominale. Dans les deux cas, le déséquilibre des efforts longitudinaux varie de -10% à 150% (axes verticaux des ellipses en pointillés). De même pour chaque niveau de charge du train (0, 3, 6 personnes/m²), les efforts X peuvent être ou non équilibrés.

Les efforts verticaux, aussi bien d'un point de vue chargement global du train que de la répartition de charge locale à l'essieu, n'influencent pas le déséquilibre des efforts longitudinaux.

IV.3.4.2 Influence du glissement roue/rail

L'essieu étant supposé rigide et le coefficient de frottement étant supposé égal pour chacun des deux contacts roue/rail, un glissement différent entre les roues droite et gauche d'un même essieu en alignement suppose qu'elles roulent donc sur des rayons de roulement différents. Or en phase d'accélération la vitesse linéaire de la roue tend à être supérieure à celle du bogie. Par conséquent, parmi les glissements entre le rail et les différentes roues, le plus important est celui de la roue la plus rapide, c'est-à-dire la roue possédant le plus grand rayon de roulement. Par conséquent, dans ces conditions, l'effort longitudinal dans le sens d'avance du train est également le plus important pour la roue possédant le plus grand rayon de roulement (Figure IV.3-9).



V_a : Vitesse d'avance du train $v_i V_a$: Vitesse de glissement longitudinal de la roue
 F_{x_i} : Effort longitudinal de réaction du rail

Figure IV.3-9 : Influence du rayon de roulement sur l'effort longitudinal de réaction du rail

Dans le cas étudié où les efforts de traction sont plus importants sur les roues gauches, cela signifie que les deux roues gauches possèdent un rayon de roulement plus important que les roues droites, autrement dit le bogie est plaqué sur la file gauche. Pour vérifier cette hypothèse, le déplacement transversal de l'essieu mesuré grâce au système de caméra NVT est étudié.

- Estimation des rayons de roulement mesurés :

La **Figure IV.3-10** montre l'évolution des efforts longitudinaux appliqués aux roues droite et gauche de l'essieu 5 en fonction de l'évolution du déplacement transversal de l'essieu. Le déplacement transversal relatif rail/roue (noté Dy) n'est pas centré autour de la valeur 0, mais oscille autour de $Dy = -5\text{mm}$.

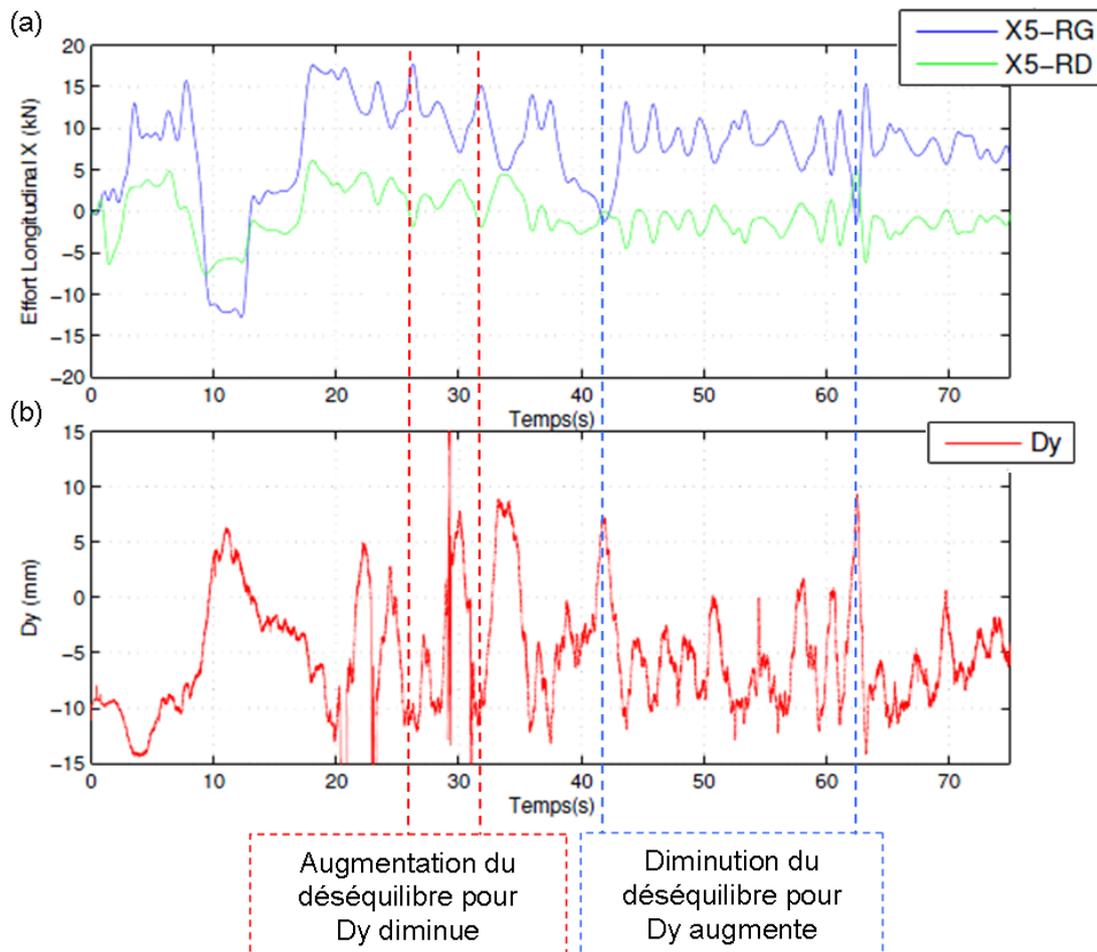


Figure IV.3-10: Evolution des efforts longitudinaux en fonction du déplacement transversale Dy de l'essieu pour la circulation 34-1-3

De plus, les forts déplacements de l'essieu engendrent une évolution importante du déséquilibre des efforts longitudinaux. Lorsque l'essieu se recentre (Dy augmente), le déséquilibre des efforts diminue. Au contraire lorsque l'essieu se décentre encore plus sur la file gauche (Dy diminue), le déséquilibre augmente. Le déséquilibre des efforts longitudinaux observé est donc bien lié à une inscription excentrée de l'essieu par rapport à la voie qui engendre une différence de rayons de roulement (et donc de glissements) entre les files droite et gauche.

La **Figure IV.3-11** représente l'évolution théorique de la différence de rayon de roulement des roues en fonction de la position transversale de l'essieu. Une position transversale $Dy = -10 \text{ mm}$ correspond ainsi à une différence de rayon de roulement de 5mm (1mm représentant 0,2% de glissement supplémentaire pour un rayon de roue de 460mm). Sur l'ensemble des circulations, le déplacement transversal de l'essieu 5 évolue jusqu'à des valeurs extrêmes de $Dy = -15\text{mm}$ qui correspondent à une position de contact sur le boudin de la roue, illogique pour une circulation en alignement. Il faut cependant noter que l'estimation de la différence de rayon de roulement sur les essieux porteurs est rendue difficile par la technique de mesure du Dy . En effet, par construction, la mesure est effectuée au niveau de la roue et comprend l'ouverture et la rotation du rail sur lui-même sous le passage de l'essieu. Le déplacement de l'essieu est donc surestimé. La **Figure IV.3-12** constitue un élément de réponse pour estimer l'ouverture du rail lors du passage du train. Elle présente les mesures de déplacement transversal réalisées par les caméras situées à droite et à gauche d'un même essieu porteur (ce qui n'est pas possible sur un essieu moteur pour des raisons d'encombrement). Ces mesures sont cohérentes, excepté lorsque le déplacement transversal devient élevé : la caméra gauche mesure alors un déplacement transversal plus important, dû à un déplacement du rail. Cette ouverture dissymétrique pourrait être influencée par la pose en traverses bi-blocs de la zone dont la flexion est simplement limitée par l'entretoise métallique (**Figure I.1-16**) et qui semble plus souple qu'une traverse monobloc en béton. Sous un essieu porteur, la **Figure IV.3-12** permet d'estimer une ouverture de la voie supplémentaire de l'ordre de 3 à 4 mm du côté se plaque l'essieu et qu'il faudrait retrancher du Dy mesuré. Cette donnée n'est pas disponible pour un essieu moteur et nécessiterait des essais supplémentaires.

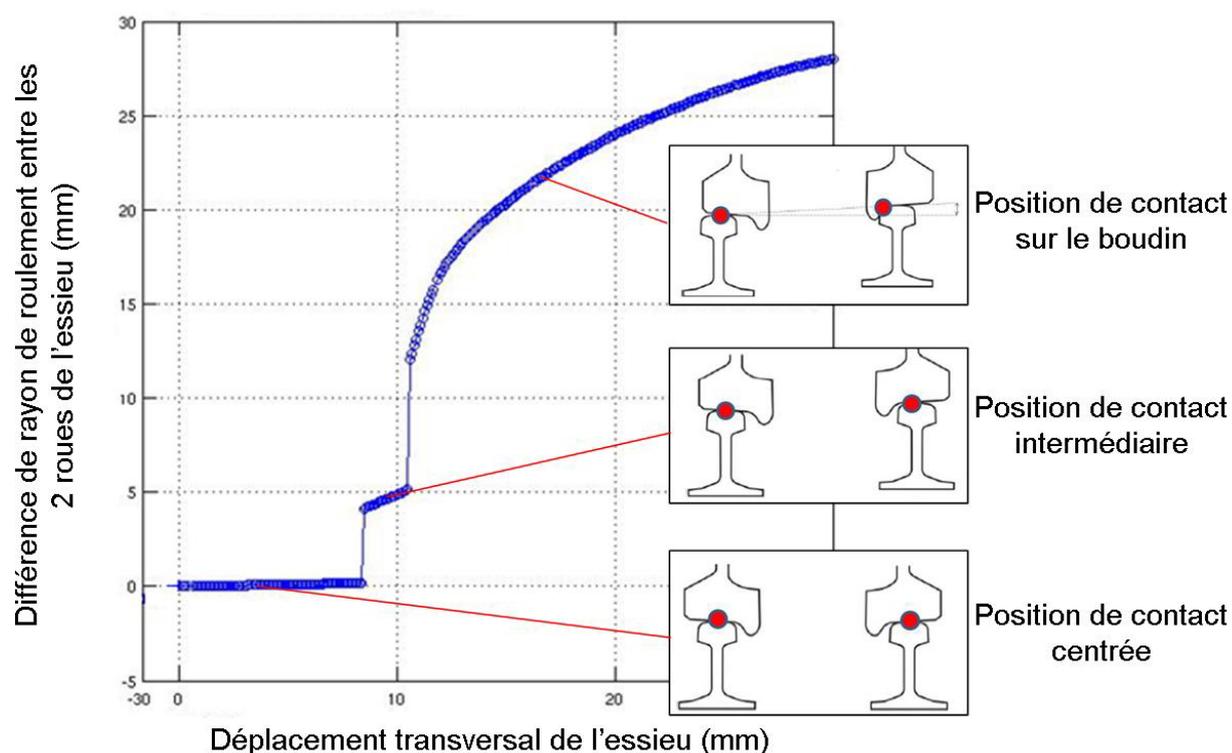


Figure IV.3-11 : Différence de rayon de roulement en fonction de la position transversale de l'essieu pour un profil de rail 60E1 et un profil de roue MI2N

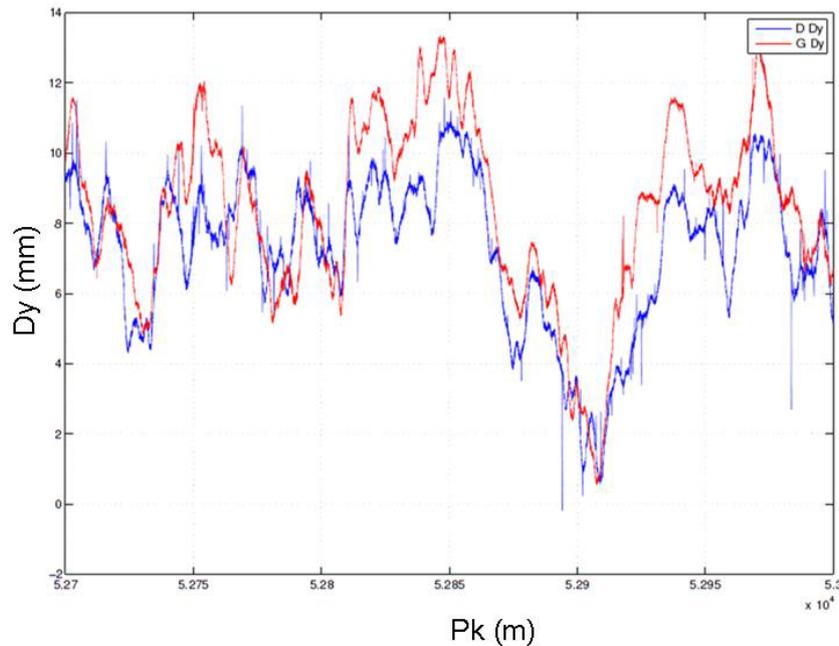


Figure IV.3-12 : Déplacement transversal de l'essieu 1 mesuré par les caméras droite et gauche

Une position excentrée de l'essieu est donc responsable du déséquilibre d'effort en traction. Néanmoins, cette position est surprenante dans un alignement par rapport aux calculs de dynamique ferroviaire effectués classiquement. Une dissymétrie du bogie (mauvaise répartition des masses, jeu dans les suspensions, raideurs différentes...) pourrait expliquer ce comportement.

- Hypothèses sur l'origine de la différence de rayons de roulement :

La **Figure IV.3-13** montre le déplacement dans les amortisseurs anti-lacets en fonction du régime de traction du train pour 2 circulations d'essai pendant lesquelles une marche sur l'erre a été effectuée dans la zone de squat. Quelque soit le régime de traction, on note un écrasement dissymétrique des suspensions, non centré autour de 0mm. En particulier, on observe un écrasement de +1mm à droite et -1mm à gauche lors de la marche sur l'erre pour la circulation 33-4-15. Cet écrasement dissymétrique augmente lors de la phase de traction. Ainsi, alors que les calculs de dynamique ferroviaire s'effectuent avec une symétrie parfaite des liaisons sur le train, les mesures montrent de légères variations entre les suspensions droites et gauches des bogies.

L'impact d'une telle variation est illustré sur la **Figure IV.3-14** issue de [BLA 13]. La simulation de la **Partie 3.1** est reproduite à l'identique en introduisant un léger non-parallélisme des essieux par une différence de tarage des suspensions primaires d'une valeur de $\pm 0,2mm$. Dans ce cas, le bogie et l'essieu trouvent une position d'équilibre déportée par rapport au centre la voie. Les efforts longitudinaux montrent alors une répartition dissymétrique à droite et à gauche, aussi bien dans la phase de traction que lors du passage sur l'erre. Les résultats sont donc similaires à ceux mesurés, excepté le fait que le déséquilibre n'augmente pas lors de l'application d'un simple couple moteur sur l'essieu. Une modélisation complète du moto-réducteur est effectuée dans [CAM 02] et les résultats sont explicités dans la partie suivante.

La compréhension globale de l'influence d'une dissymétrie du bogie sur les efforts au contact requerra des simulations supplémentaires pour tester l'impact d'autres paramètres : un déplacement transversal initial de l'essieu, une raideur différente dans les suspensions droite et gauche au niveau des suspensions primaires et/ou secondaires... Celles-ci ne sont pas effectuées dans le cadre de ce travail de thèse.

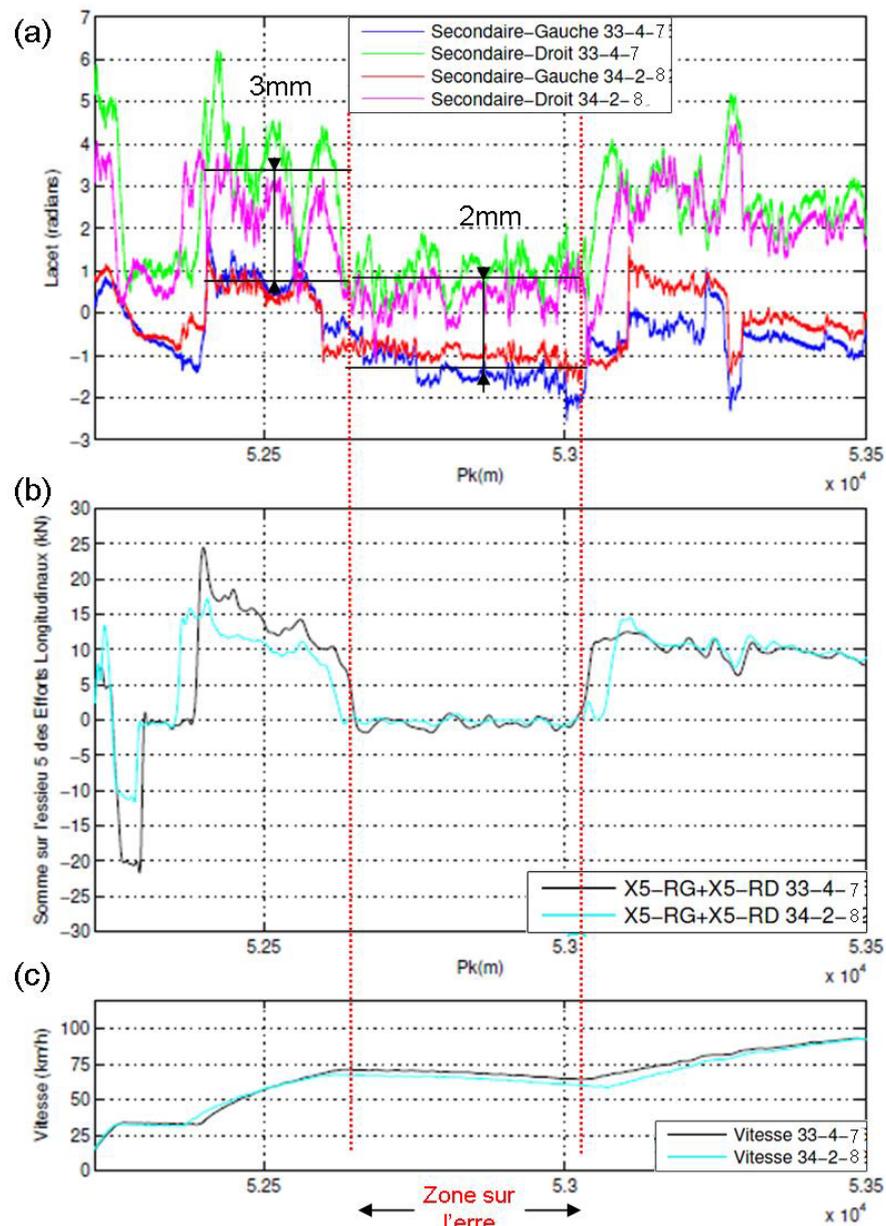


Figure IV.3-13 : Déplacements dans les amortisseurs anti-lacets en fonction du régime de traction

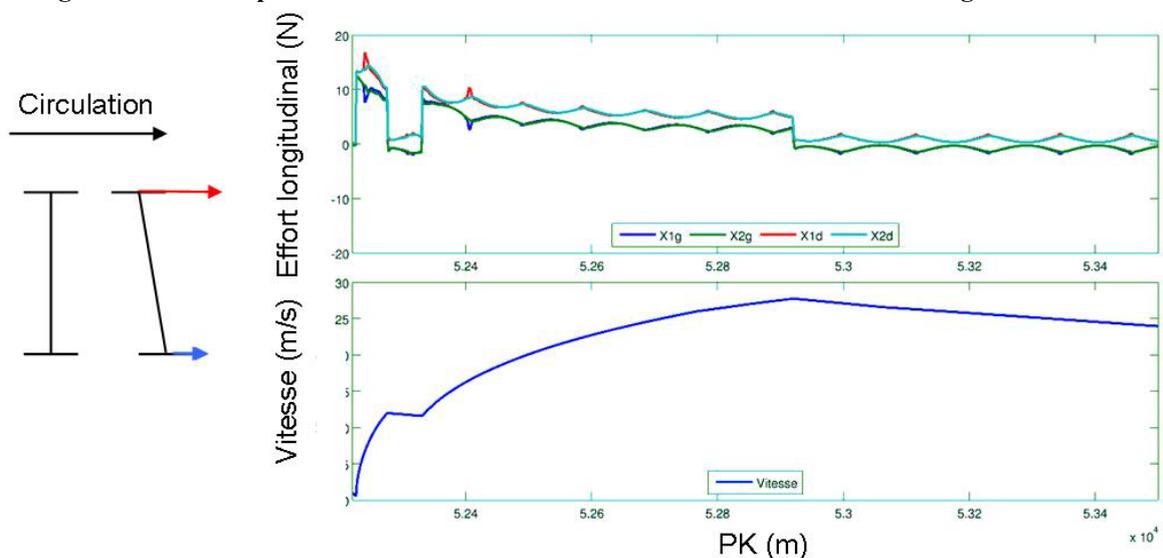


Figure IV.3-14 : Impact d'un mauvais parallélisme des essieux sur la répartition des efforts de traction

IV.3.4.3 Influence du niveau de traction

- Mesure de l'influence du niveau sur le déséquilibre des efforts longitudinaux :

Un autre facteur influent sur la répartition des efforts longitudinaux semble être lié à l'état de traction du train. Lors de la mise en marche des moteurs pour répondre à la demande d'accélération requise par le conducteur, le déséquilibre des efforts augmente.

La **Figure IV.3-15** présente l'évolution des efforts longitudinaux sur l'essieu 5 pour deux circulations caractérisées par le même type de profil de vitesse : 2 phases d'accélération séparées par un passage sur l'erre. Il est intéressant de noter que pour ces deux circulations effectuées lors de nuits différentes (donc pour des niveaux de chargement différents) mais avec des profils de vitesse identique que le comportement de l'essieu est similaire. Le phénomène global est bien déterministe. Ce comportement de l'essieu se décompose en trois phases. Lors de la première accélération, l'essieu se déporte et un déséquilibre d'effort de traction d'environ 8kN est créé entre les deux roues. Au passage sur l'erre, les efforts entre la roue droite et gauche sont de même intensité mais de signes opposés pour un déséquilibre d'environ 5kN. L'essieu s'est en partie recentré. À la reprise de traction, le déséquilibre augmente de nouveau jusqu'à atteindre environ 10kN avec une roue gauche supportant l'intégralité de l'effort de traction. L'état de traction du train influe donc directement sur le déséquilibre.

La **Figure IV.3-16** montre cependant que le niveau de traction à un instant donné ne permet pas de prévoir le déséquilibre de l'essieu. Celui-ci dépend de l'historique de traction.

La **Figure IV.3-16** présente l'évolution des efforts longitudinaux sur l'essieu 5 pour deux circulations dont la traction totale sur l'essieu est identique entre les PK 52650 et 53100 et différente en dehors de cette zone. Sur la circulation 33-3-1, l'effort de traction peut être considéré quasiment équilibré tout le long de la marche (**Tableau 2**). Pour la circulation 33-3-6 (soit 3 allers-retours plus tard seulement !), le niveau de traction appliqué à l'essieu est plus important que sur la marche 33-3-01 et le déséquilibre sur les efforts X mesurés est d'en moyenne 9kN. Dans la seconde, pour laquelle le niveau de traction est le même pour les deux circulations, pour l'essieu 5 de la nuit 33-3-6, l'écart entre les valeurs d'efforts longitudinaux des roues change pour chaque circulation, mais l'écart entre-elles persiste. Dans la seconde phase de traction différente, l'écart de traction augmente de nouveau pour la circulation 33-3-6. Si le niveau de traction influence le déséquilibre des efforts longitudinaux sur l'essieu, ces conséquences semblent difficiles à quantifier sur les différentes circulations.

La **Figure IV.3-17** illustre la dispersion de déséquilibre en fonction de l'effort maximal de traction atteint durant les circulations. On note l'absence de très forts déséquilibres pour les faibles niveaux de traction et au contraire l'absence de situations d'équilibre pour les tractions élevées. Cependant, au vu de la dispersion du nuage de points, le déséquilibre ne semble pas lié uniquement au niveau de traction. L'interaction avec d'autres facteurs non mesurés (comme le parallélisme des essieux) complexifie l'analyse.

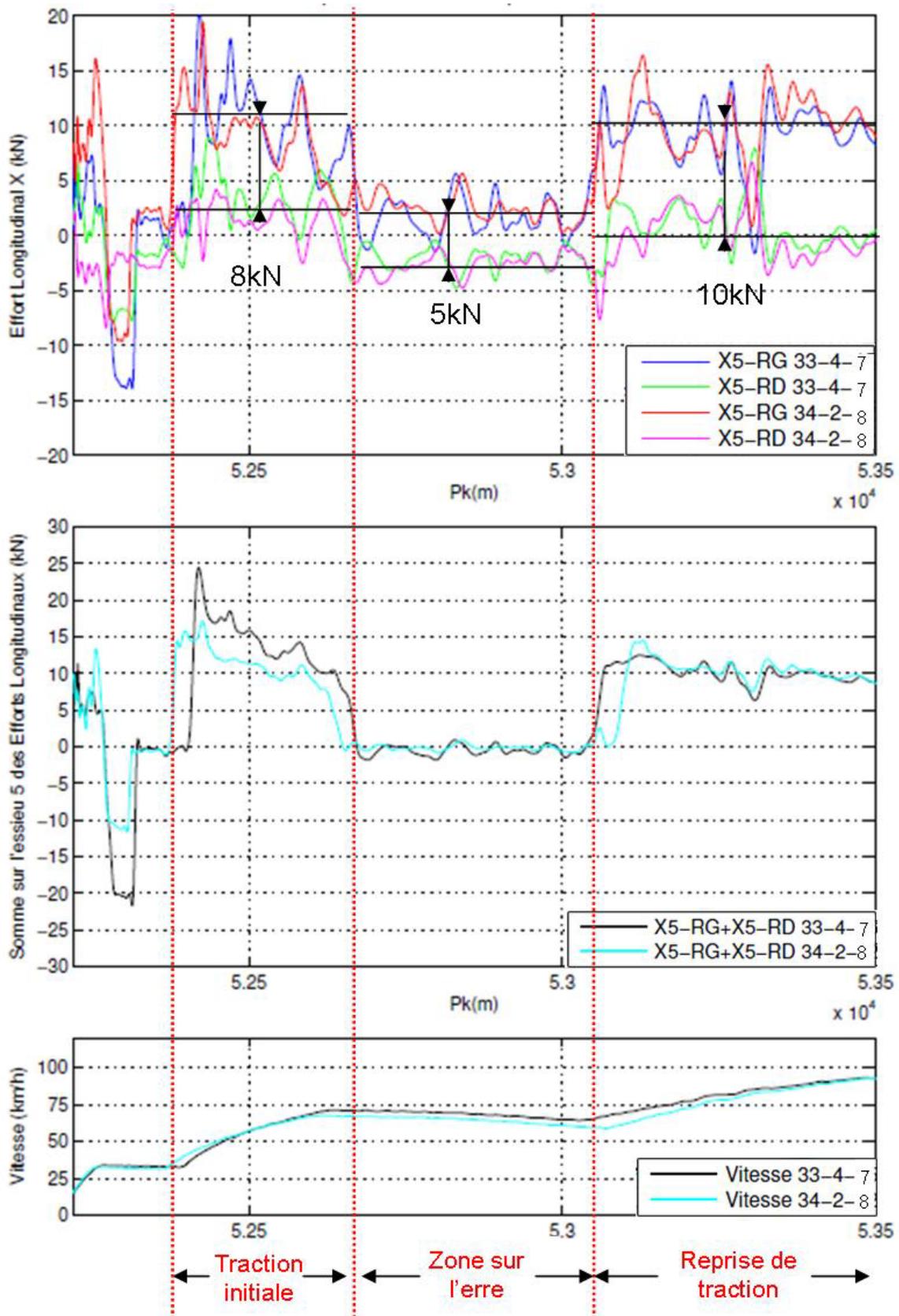


Figure IV.3-15 : Répartition des efforts longitudinaux sur l'essieu 5 lors d'un passage sur l'erre (Circulation vers les PK croissants)

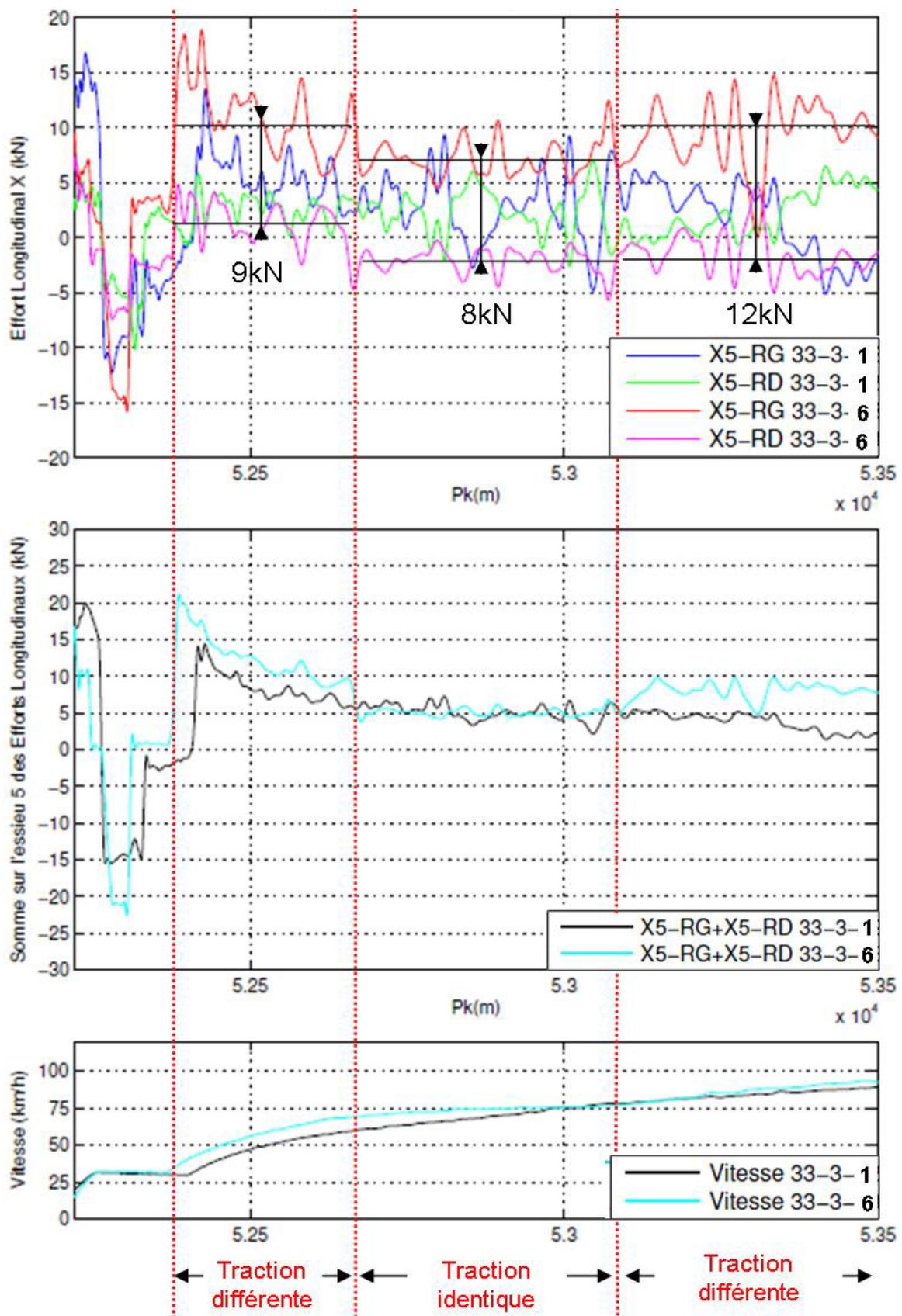


Figure IV.3-16 : Influence de la traction initiale sur la répartition des efforts longitudinaux sur l'essieu 5

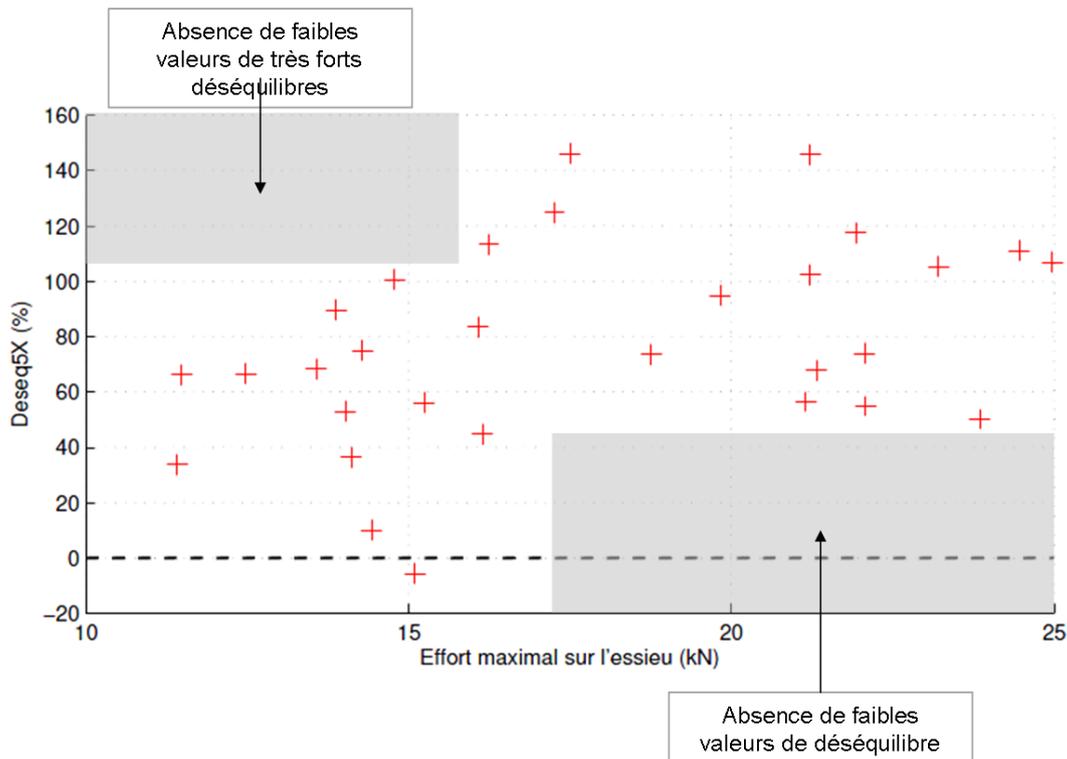


Figure IV.3-17 : Influence de la traction maximale appliquée lors des circulations d'essai sur le déséquilibre des efforts longitudinaux

- Hypothèses sur l'origine de l'influence de la traction :

Sur un essieu moteur des bogies du MI2N, le lieu d'engrènement ne se fait pas au centre de l'essieu. Le réducteur se situe au quart de la longueur de l'essieu (**Figure IV.3-18**). D'après le torseur des efforts appliqués à l'essieu en sortie de l'engrenage (calculé par Campedelli [CAM 02] et Blanchard [BLA 13]), il existe un effort longitudinal résiduel au niveau des paliers du réducteur. Cet effort est donc décentré par rapport à l'axe du bogie et le moment qu'il crée est donc différent pour les roues droites et gauches. De plus la reprise de l'effort de traction par les bielles crée également un couple sur le bogie [BLA 13]. Cet engrènement dissymétrique pourrait influencer l'inscription du bogie. Les calculs effectués dans [BLA 13] montrent que ce phénomène pourrait, dans les phases de traction, s'ajouter ou compenser, l'impact d'un mauvais parallélisme des essieux. Une étude paramétrique est cependant nécessaire pour mieux comprendre ce mécanisme.

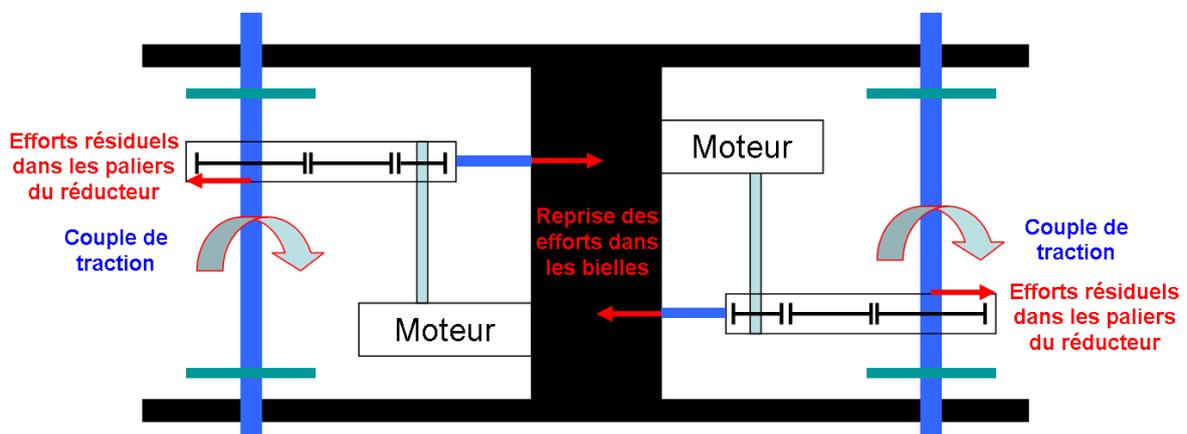


Figure IV.3-18 : Lieux de reprise des efforts sur un bogie lors de l'application d'un couple moteur

IV.3.4.4 Influence des conditions d'adhérence

La comparaison de deux circulations de chargement équivalentes et pour lesquelles on applique une traction équivalente montre une sensibilité du déséquilibre en X à l'arrosage (**Figure IV.3-19**). Avec arrosage, la répartition des efforts longitudinaux est plus équilibrée entre les deux roues. On peut supposer que l'influence de l'arrosage sur l'équilibre du bogie peut-être de deux types :

- Soit l'arrosage joue un rôle indirect. On note au début de la circulation, lors de la traction initiale, une diminution brutale de l'effort total vu par l'essieu. Celle-ci traduit un glissement macroscopique de la roue sur le rail, pour lequel le système anti-patineur a commandé une diminution de la consigne de traction. Ainsi, l'arrosage a provoqué une diminution du niveau de traction globale dont l'influence a été établie dans la partie précédente.
- Soit l'arrosage a une influence directe sur le comportement de l'essieu. Les rails humides vont modifier les conditions de contact et peuvent participer à un rééquilibrage des efforts longitudinaux. En effet, dans des conditions de lubrification importante, la saturation de l'ellipse de contact entraîne un effort maximal transmissible limité. La saturation pour de faibles niveaux d'effort de la roue gauche l'empêche donc de « phagocyter » l'effort de traction de l'essieu. Celui-ci est donc repris par la roue droite et l'effort de traction est ainsi mieux réparti sur l'essieu.

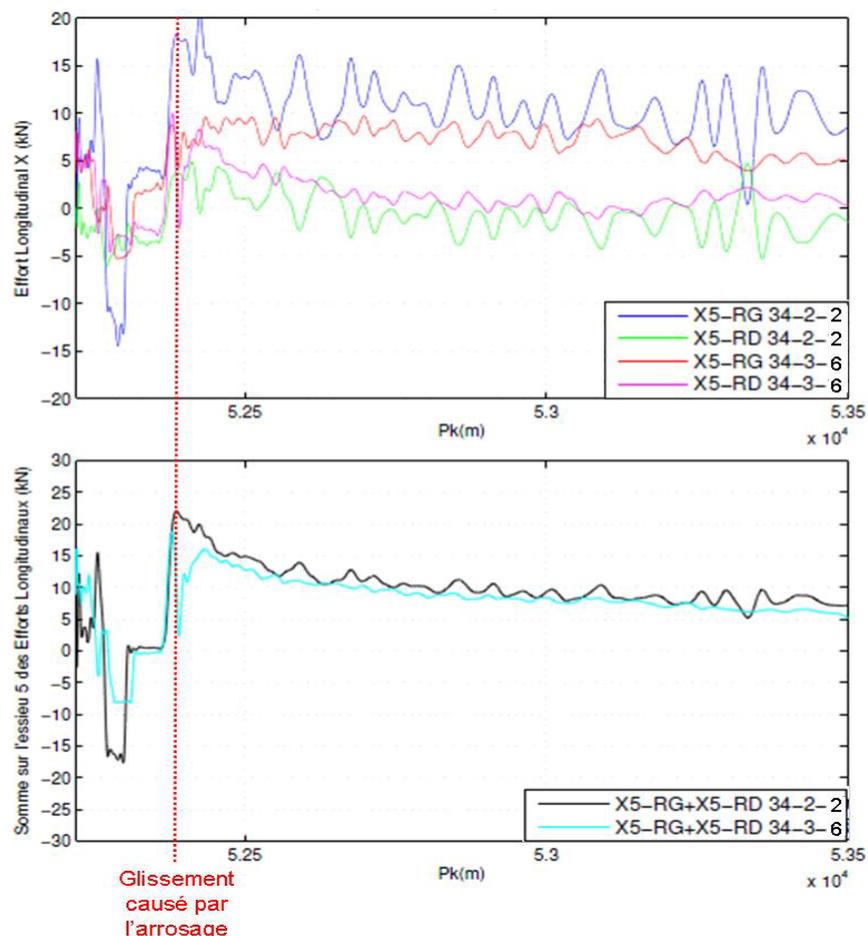
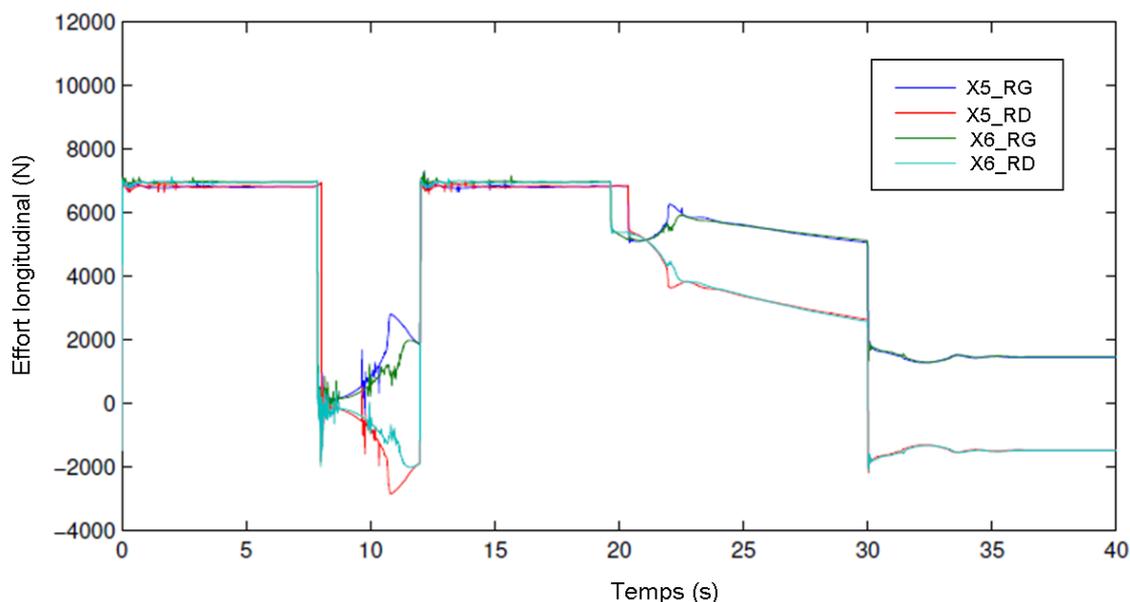


Figure IV.3-19: Influence d'un arrosage initial sur la répartition des efforts longitudinaux sur l'essieu 5

Cette deuxième hypothèse est vérifiée par calcul. La simulation de la **Figure IV.3-14** est effectuée à l'identique pour un coefficient de frottement de 0,1. Tant que l'effort de traction sur l'essieu est supérieur à l'effort transmissible par les roues, l'essieu reste centré sur la voie et la traction est équilibrée. Cependant avec la vitesse le couple fourni par le moteur diminue (**I.1.2.2**), et lorsque l'effort de traction est inférieur à la somme des efforts transmissibles, le déséquilibre s'opère de nouveau.



L'étude des conditions de contact s'est jusqu'à présent concentrée sur les niveaux d'efforts moyens mesurés. L'étude des variations de ces signaux est également essentielle pour comprendre les conditions de contact dans les zones de squats et en déduire le comportement dynamique du train.

IV.3.5 Etude de la partie dynamique des efforts de contacts

Les courbes d'efforts verticaux Q (**Figure IV.3-4**) et longitudinaux X (**Figure IV.3-6**) sont caractérisées par de nombreux pics d'amplitudes variables dont la dispersion est représentée dans sur la **Figure IV.3-8**. Pour les efforts Q, l'amplitude maximum constatée est comprise entre 5 et 10% de la valeur moyenne. Dans la direction longitudinale, l'amplitude de ces pics monte à plus de 50% de l'effort moyen. Ce phénomène est donc loin d'être négligeable, car à PK donné, l'amplitude peut être du même ordre de grandeur que l'écart constaté sur les valeurs moyennes.

Afin de comprendre l'origine de ces variations, on compare en **Figure IV.3-21**, la périodicité des efforts Q et X de l'essieu 5 avec le roulis de caisse et le lacet du bogie 3. Le roulis est calculé comme la différence des déplacements entre les suspensions secondaires verticales droite et gauche. De la même manière, le lacet est calculé comme la différence des déplacements entre les suspensions secondaires longitudinales du bogie 5.

On constate que l'effort Q est synchronisé avec les variations du roulis de caisse, chaque pic se correspondant. De la même manière, la partie dynamique de l'effort longitudinale est superposable à celle du lacet de bogie.

La variation dans le temps du déséquilibre des efforts longitudinaux sur un essieu s'explique donc par une variation de la différence des rayons de roulement des roues droite et gauche, elle-même due à une mise en lacet de l'essieu autour de sa position moyenne décentrée.

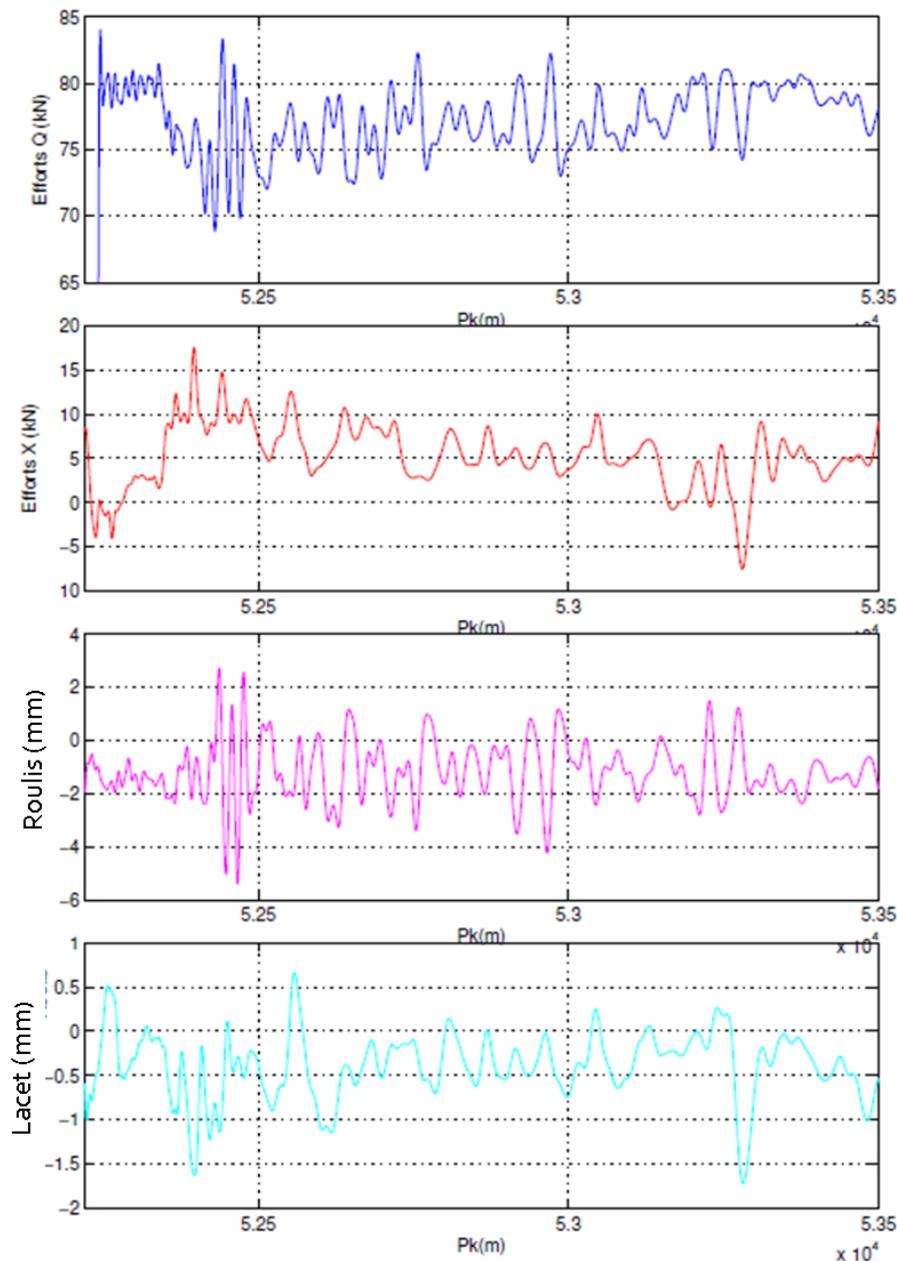


Figure IV.3-21 : Influence du roulis de caisse et du lacet de bogie sur la partie dynamique des signaux d'efforts Q et X (Q5-RG et X5-RG)

De plus, les mesures montrent que pour des profils de vitesse similaire, ce comportement dynamique fonction des angles de lacet et de roulis de l'essieu est indépendant de la position transversale de l'essieu. On observe ainsi une forte répétabilité de la partie dynamique des signaux indépendamment de leur valeur moyenne.

La **Figure IV.3-19** permet de comparer les efforts longitudinaux pour la roue gauche de l'essieu 5 pour des circulations effectuées avec des niveaux de chargement et des profils de vitesses différentes. Pour des profils de vitesse similaire, les mesures montrent une grande répétabilité de la localisation des extremums locaux. Cependant, la courbe de vitesse de la circulation 34-4-18 est caractérisée par un passage sur l'erre et une localisation de ses extremums différente. Si avant la coupure de traction, les signaux d'efforts sont très similaires, après certains extremums persistent aux mêmes PK, mais d'autres disparaissent ou sont décalés. On peut donc supposer que ces surcharges dynamiques ont différentes origines, liées soit à la géométrie de la voie ou à un comportement dynamique du train.

Cette répétabilité de la localisation des extremums locaux des efforts, lors de circulation pour des profils de vitesse similaire, est un résultat important. En effet, les mesures préliminaires de vitesses en circulation réelle ont montré une disparité similaire à celle simulée durant l'essai. Concrètement, on peut donc s'attendre à une accumulation importante d'efforts à des PK précis provoquée par l'ensemble de la flotte en circulation.

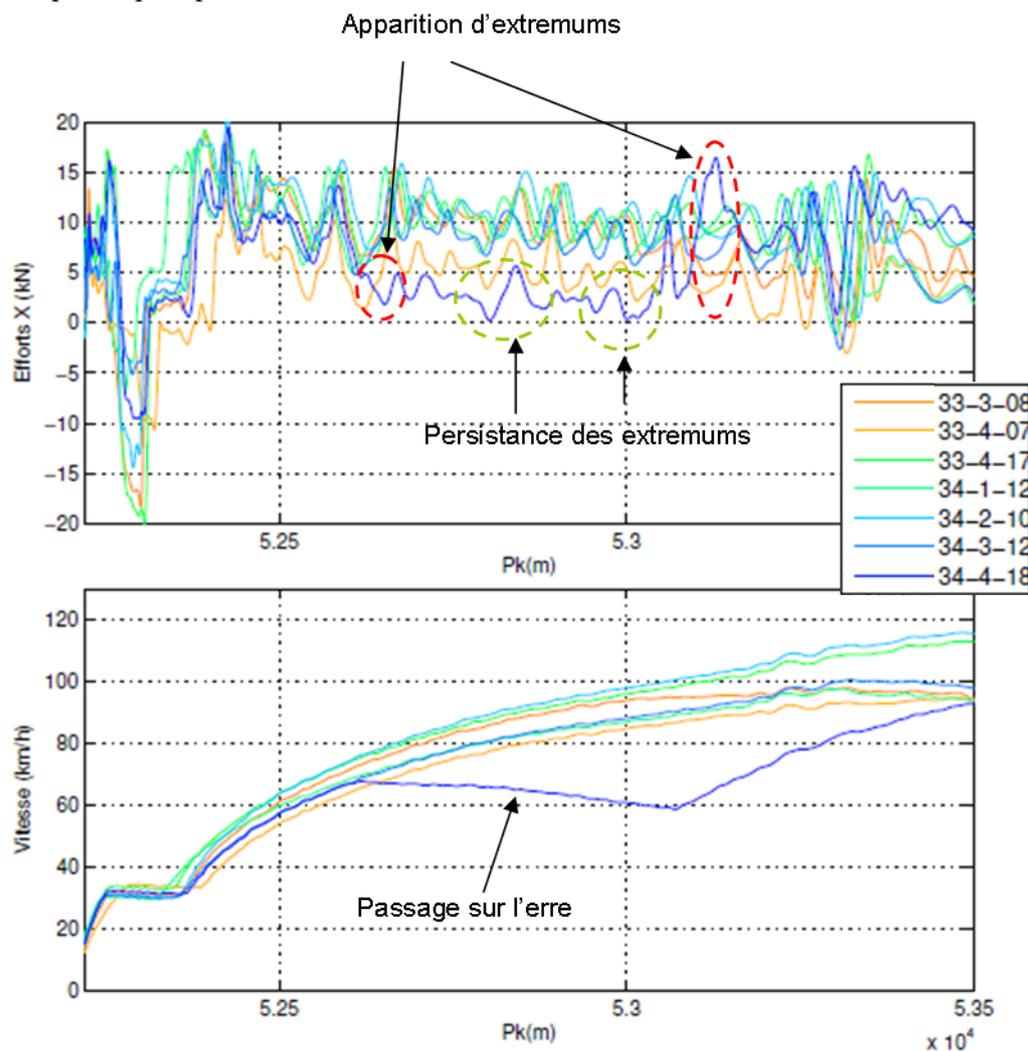


Figure IV.3-22 : Répétabilité des efforts pour la partie dynamique des efforts Q et X pour différentes circulations de nuit différentes (et donc de niveaux de chargement différents)

IV.3.6 Dispersion de la localisation des contacts

L'un des objectifs de l'essai IRR est de quantifier la dispersion de la localisation des contacts pour comprendre la formation du motif de microstructures par bandes longitudinales observées dans la partie II.2.2.3. De ce point de vue, l'amplitude mesurée des déplacements transversaux de l'essieu (Figure IV.3-12) permet d'expliquer l'étendue de la bande de roulement sur la zone de Bussy-St-Georges. Grâce à ces débattements, la roue peut en effet prendre appui sur des positions de contacts depuis la joue intérieure jusqu'à des positions décentrées vers l'extérieur de la bande de roulement du rail.

De plus, les importantes variations de déplacement transversal de l'essieu impliquent qu'une roue n'est pas dédiée à la formation d'une bande sur plusieurs mètres. Chaque roue participe ainsi à la formation de plusieurs bandes longitudinales de microstructures sur quelques centimètres (Figure IV.3-23). La microstructure continue observée sur plusieurs centaines de mètres s'explique donc par l'accumulation des contacts avec toutes les roues de tous les trains. L'homogénéité du motif résulte probablement du fait qu'à une position transversale sur le rail correspond globalement un seul rayon de roulement (et donc un niveau d'effort de cisaillement donné) pour des profils de roue identique.

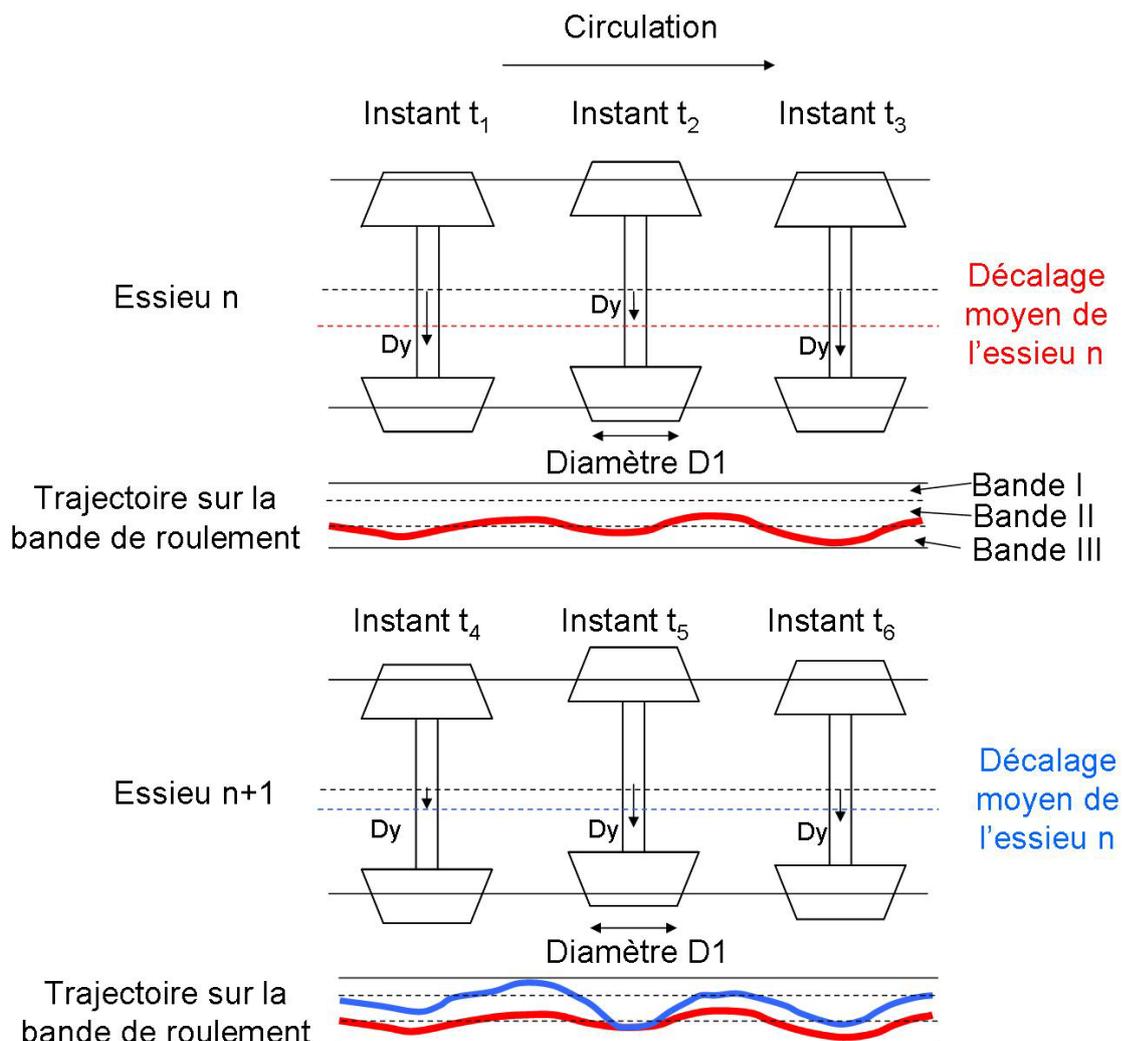


Figure IV.3-23 : Formation des bandes longitudinales de microstructure (Chapitre II)

IV.4 Synthèse et conclusion du chapitre

Durant l'essai interface roue/rail un train a été instrumenté et mis en circulation dans les zones de squats sur lequel une forte inhomogénéité du rail avait été observée (**Figure IV.4-1**). Cet essai a permis de mesurer les conditions de contact dans la zone de Bussy-St-Georges et notamment d'identifier une forte dissymétrie de l'effort de traction entre les deux roues d'un essieu moteur. Bien que la zone soit située en alignement, il en résulte que le rail subit des efforts moyens de cisaillement largement supérieurs au comportement nominal attendu. De plus, à cette valeur moyenne s'ajoute un comportement dynamique qui augmente localement et de manière répétée, le niveau d'effort sur certaines portions de voies. L'intense accumulation de déformations plastiques et l'apparition de phase blanche observée au niveau du rail dans les analyses tribologiques du **Chapitre II** trouvent donc une origine mécanique potentielle grâce à cet essai.

Il est important de noter que la dissymétrie de l'effort de traction, issue de la variabilité des paramètres de conception du train, n'est pas spécifique à la zone d'étude. Ce comportement du train n'est donc pas suffisant à lui seul pour discriminer une zone potentielle de formation du squat. La réaction de la voie vis-à-vis de ce comportement inattendu du train (par l'ouverture dissymétrique des rails ou de la localisation des extremums locaux d'efforts à cause de petites variations géométriques) joue également un rôle. De plus, la zone de Bussy-St-Georges est également caractérisée par une vitesse d'exploitation élevée et similaire pour tous les véhicules, qui nécessite des niveaux de traction amplifiant le phénomène. La conjonction de l'ensemble de ces paramètres crée un couplage roue/rail propice à l'apparition du squat sur Bussy-St-Georges.

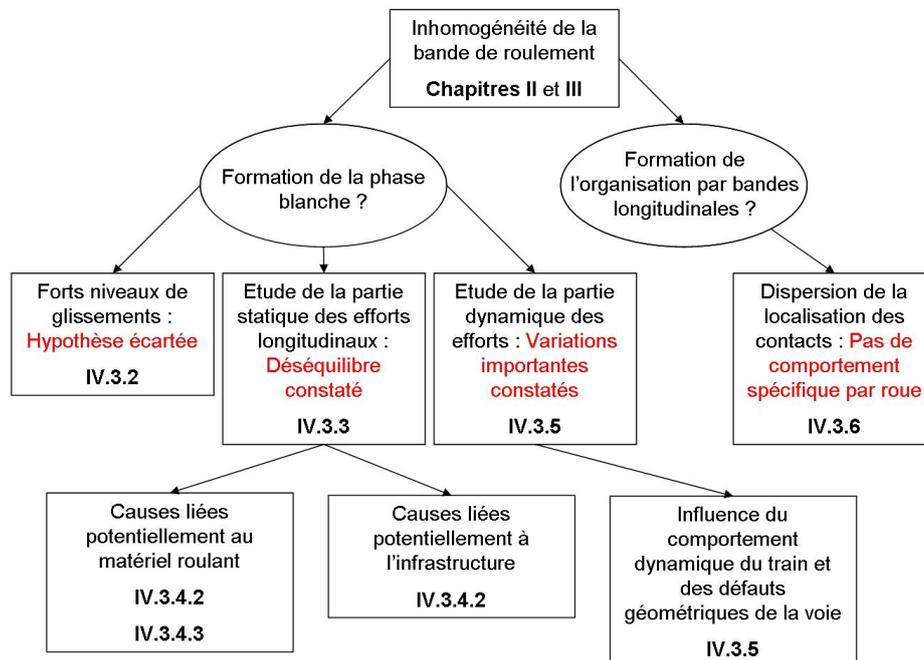


Figure IV.4-1 : Diagramme de synthèse du chapitre IV

Pour valider dans son ensemble, le scénario tribologique d'amorçage du squat proposé dans la partie **III.2.1**, deux étapes sont encore nécessaires :

- Sur une échelle de plusieurs années, quelle réponse tribologique adopte la microstructure des rails face à ces conditions de contacts ? Cette microstructure est-elle semblable au faciès par bandes observées précédemment dans le chapitre II ?
- Peut-on reproduire cette réponse de la microstructure en laboratoire à partir des valeurs mesurées durant l'essai interface roue/rail ?

Chapitre V : Etude des réponses tribologiques de l'acier à rail

Les résultats de l'essai Interface Rail Roue (IV.2.3.2) ont montré un comportement dynamique du train responsable de niveaux d'efforts de cisaillement inattendus à l'interface roue/rail. Pour valider l'influence de ces champs de contraintes sur la microstructure observée à la surface du rail en 2009 (II.2.2.3), plusieurs essais ont été mis en place à la fois sur site et en laboratoire. L'objectif est de caractériser la réponse tribologique (I.3) de l'acier à rail dans les zones de squats à différentes échelles spatiales et temporelles.

L'essai sur site (c'est-à-dire sur une voie ferroviaire circulée normalement) offre ainsi la possibilité d'analyser l'évolution de la géométrie et de la microstructure du rail soumis à des conditions réelles de contacts, mais non contrôlées et difficilement quantifiables (du moins à l'échelle du contact). De leur côté, les essais en laboratoire offrent l'avantage de mieux maîtriser les conditions de contact, mais perdent en représentativité par rapport au cas de contact réel.

V.1 Essai global sur site : Suivi de la zone de Bussy

Une zone à forte densité de squats a été sélectionnée sur le réseau et renouvelée fin 2009 par plusieurs rails de différentes nuances d'acier. L'objectif est d'étudier leur sensibilité au mécanisme de formation du squat supposé précédemment (III.2.1) vis-à-vis de leurs propriétés macroscopiques (dureté...) et/ou microscopiques (tailles de grains, taux de carbone...).

V.1.1 Description de la zone étudiée et de la méthode de suivi

V.1.1.1 Historique et géométrie de la zone d'essais sélectionnée

Le site retenu par la RATP pour l'étude du suivi tribologique des squats est la même que celle traitée en priorité dans le post-traitement de l'essai IRR (Chapitre IV). Elle se trouve sur la voie 1 de la ligne A du RER, à proximité de la gare de Bussy-St-Georges (Figure II.2-1). Il s'agit donc d'une zone située en extérieur et en sortie de gare qui est soumise à l'accélération d'une centaine de trains quotidiennement. Toute la zone est localisée dans un alignement dont la rampe passe de 2 à 13 ‰ au PK 52759.

En place depuis 1995, les rails de nuance R260 de ce site présentaient une forte densité des défauts (10 à 40 défauts / rail d'une longueur moyenne de 36m) dont les localisations ont été repérées avant l'opération de pose de la zone d'essais.

V.1.1.2 Disposition de la zone et méthode de suivi

À la fin de l'année 2009, les deux files de rails de la zone ont été renouvelées sur 180m par cinq rails de 36m composés de nuances d'acier différentes. Un rail de la nuance perlitique R200 et un second de la nuance bainitique B360 sont ainsi posés en alternance avec du rail classique R260. De plus, comme lors d'un renouvellement de rail classique, un meulage initial a été effectué pour éliminer d'éventuels défauts de laminage présents en surface. Cependant, la barre n°5 n'a été meulée que sur la moitié de sa longueur pour étudier l'influence de ce meulage initial. La composition de la zone d'essai est décrite dans le **Tableau V.1-1** et la **Figure V.1-1**.

Rail N°	Nuance d'acier	Structure	Meulage initial	Résistance à la rupture (MPa)	Elongation A (%)	Dureté (HB)
1	R260	Pertlitique	Oui	≥ 880	≥ 10	260-300
2	R200	Pertlitique	Oui	≥ 680	≥ 14	200-240
3	R260	Pertlitique	Oui	≥ 880	≥ 10	260-300
4	B360	Bainitique	Oui	≥ 1200	≥ 13	350-390
5	R260	Pertlitique	Oui 18m Non 18 m	≥ 880	≥ 10	260-300

Tableau V.1-1 : Caractéristiques des rails de la zone d'essai [TAT 13]

Les évolutions des morphologies de surface des rails ont été suivies pendant plusieurs années. En plus d'une inspection visuelle de toute la zone, plusieurs points de références ont été définis au milieu de chaque rail et inspectés périodiquement (tous les 6 mois) à travers différentes méthodes de contrôle de morphologie :

- La surface a été prise en photographie,
- La géométrie du profil transversal a été mesurée par un profilomètre mécanique manuel (Précision de la mesure : +/-54 µm),
- La dureté macroscopique de surface a été mesurée le long du profil transversal par un duromètre portable,
- Les fissures débouchantes en surface ont été repérées par un détecteur à courant de Foucault le cas échéant.

De plus, fin 2012, après 3 ans de circulation, plusieurs prélèvements ont été effectués (**Figure V.1-1**). Sur chaque file de rails un coupon de R260 et de B360 a ainsi été prélevé et confiné dans des boîtes hydrophobes. Ces échantillons ont alors été coupés longitudinalement et transversalement, polis et attaqués par une solution Nital 4% pendant 5 secondes pour permettre un examen métallurgique de la microstructure sous-surfacique. Cet examen a été réalisé en microscopie optique et au microscope électronique à balayage.

Les parties suivantes détailleront les résultats du suivi sur site et de l'examen métallurgique à 3 ans.

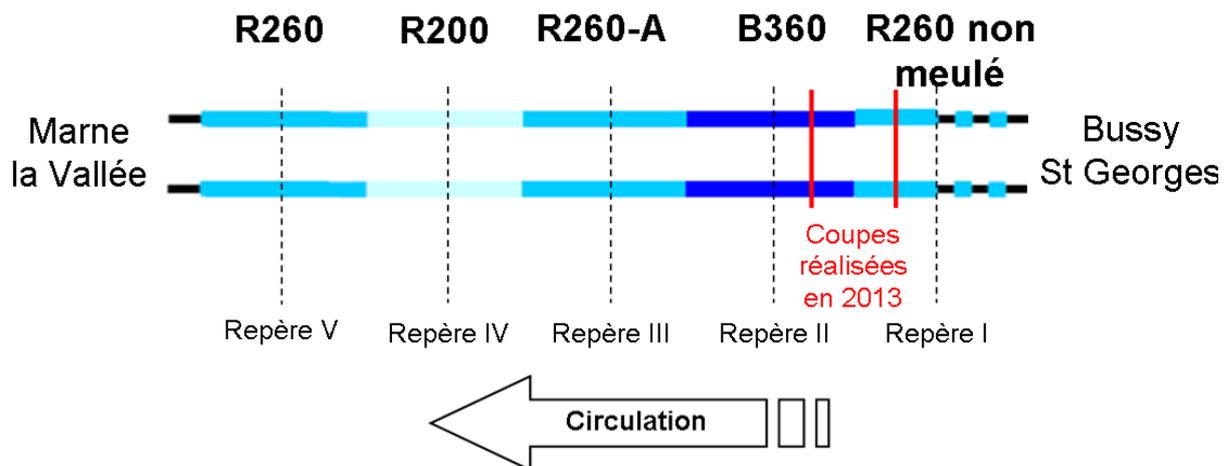


Figure V.1-1 : Disposition de la zone d'essais et localisation des prélèvements

V.1.2 Evolution de surface des rails

Avant d'aborder l'évolution des morphologies de surface des rails nuance par nuance, plusieurs commentaires peuvent être faits sur la zone d'essais dans son ensemble.

V.1.2.1 Aspect général des rails de la zone d'essais

Comme attendu, la microstructure de chacune des nuances testées a évolué et tend à adopter une morphologie par bandes longitudinales comme observée dans le **Chapitre II (II.2.2.3)**. Cependant, le suivi de la zone d'essai révèle également le rôle joué par les mécanismes d'usure dans la réponse tribologique pour chacun des rails considérés.

- Accommodation plastique du rail et transformation tribologiques de surface:

Les moyens de caractérisations de la microstructure sur le terrain étant limités, elle est ici caractérisée par sa dureté et l'ensemble des mesures est résumé dans le **Tableau V.1-2**. Il présente la valeur moyenne de 5 mesures de dureté pour les différentes nuances sur et en dehors d'îlots de phases blanches.

Ces mesures traduisent une partie de la réponse tribologique du rail en termes d'accommodation plastique et de transformations tribologiques de surface. Plusieurs constats peuvent ainsi être faits :

- En dehors des zones de phase blanche, l'élévation de dureté constatée sur chaque nuance entre le rail neuf et les mesures prises en 2010 illustrent l'influence de l'écrouissage du matériau. On peut en déduire indirectement une accommodation plastique importante du matériau (rapprochement et réorientation des lamelles, réduction de la taille de grains...). Ce constat est en accord avec l'observation d'un élargissement progressif de la bande de roulement principal. Ce phénomène sera détaillé dans les parties suivantes à partir des photographies de surface réalisées.
- De plus, chaque nuance a développé de la phase blanche en surface. La comparaison des mesures sur et en dehors des zones supposées de phase blanche, montre une élévation de la dureté comprise entre 100Hv et 250Hv suivant les nuances. On assiste bien à une modification importante des propriétés mécaniques du matériau, et donc probablement à une transformation solide/solide.
- Enfin, la comparaison entre les mesures réalisées entre novembre 2010 et mai 2011 montre une différence d'évolution suivant les zones considérées. En dehors de la phase blanche, la dureté reste globalement identique alors qu'elle a tendance à augmenter de 60 à 80 Hv sur les zones transformées. Naturellement, la technique de mesure employée n'est pas forcément adaptée à de telles comparaisons espacées dans le temps (car elle est extrêmement locale et il est difficile de conserver les mêmes points de mesure). Néanmoins, la tendance observée pourrait aussi s'expliquer physiquement par une évolution de la microstructure soit par écrouissage de la phase blanche et du substrat, soit par évolution de l'épaisseur de phase blanche entre les deux visites. En dessous d'une certaine limite, un enrichissement en carbone de la martensite pourrait également provoquer également une augmentation significative de la dureté [STO 11b].

	File	Localisation	Dureté moyenne (Hv)		Ecart (Hv)
			Nov. 2010	Mai 2011	
Repère 1 (R260)	Droite	Sur phase blanche	469	535	66
		Hors phase blanche	344	358	14
	Gauche	Sur phase blanche	447	531	84
		Hors phase blanche	379	422	43
Repère 2 (R200)	Droite	Sur phase blanche	361	429	68
		Hors phase blanche	288	291	3
	Gauche	Sur phase blanche	361	386	25
		Hors phase blanche	277	254	-23
Repère 3 (R260)	Droite	Sur phase blanche	534	524	-10
		Hors phase blanche	382	369	-13
	Gauche	Sur phase blanche	487	527	40
		Hors phase blanche	365	366	1
Repère 4 (B360)	Droite	Phase blanche centrale	Absente	609	-
		Ilots extérieurs	523	531	8
		Hors phase blanche	426	409	-17
	Gauche	Sur phase blanche	546	623	77
		Hors phase blanche	386	430	44
Repère 5 (R260 non meulé)	Droite	Sur phase blanche	Absente	535	-
		Hors phase blanche	306	309	3
	Gauche	Sur phase blanche	435	522	87
		Hors phase blanche	292	275	-17

Tableau V.1-2 : Moyenne des mesures de dureté réalisées sur les différentes nuances d'acier.

- Usure du rail :

Au sein (ou à la frontière) de ces zones de phases blanches, plusieurs amorces de fissures ont été détectées en surface au cours de ces 3 années de suivi. Repérées d'abord visuellement, leur présence a été confirmée à l'aide d'un détecteur à courants de Foucault. Cependant, la présence initiale de ces fissures n'a pu être confirmée lors de la visite de contrôle suivante. Ces fissures ne se sont donc pas propagées. Fin 2012, la zone d'essai n'a développé de squat naissant sur aucune des nuances d'acier étudiées. La disparition de ces fissures est attribuée classiquement à l'usure des profils de rail [DON 05, STO 11a]. Au même titre que l'accommodation plastique du rail par fatigue (**I.3**), l'usure est une partie de la réponse tribologique du matériau aux conditions de contact et à son environnement. En fonction des conditions de contact, des matériaux et des paramètres environnementaux, différents mécanismes d'usure prennent place. Le dénominateur commun à tous ces phénomènes est de provoquer une perte progressive de matière plus ou moins sévère suite à un mouvement relatif entre deux corps. Des détails plus approfondis pourront être trouvés dans les ouvrages de tribologie [COUR 68, GOD 72, CAR 01].

Plusieurs études [BOU 04, STO 11a] ont lié le niveau de perte de matière engendrée par les mécanismes d'usure aux propriétés mécaniques macroscopiques du matériau. La **Figure V.1-2** illustre par exemple, pour des conditions de contact équivalentes, la diminution de perte de matière avec l'augmentation de la dureté du matériau. Cependant, l'apparition de rails traités thermiquement et de nuances non granulaires (de type structure bainitique) conduit à considérer également l'influence de la microstructure sur les taux d'usure [DAY 12].

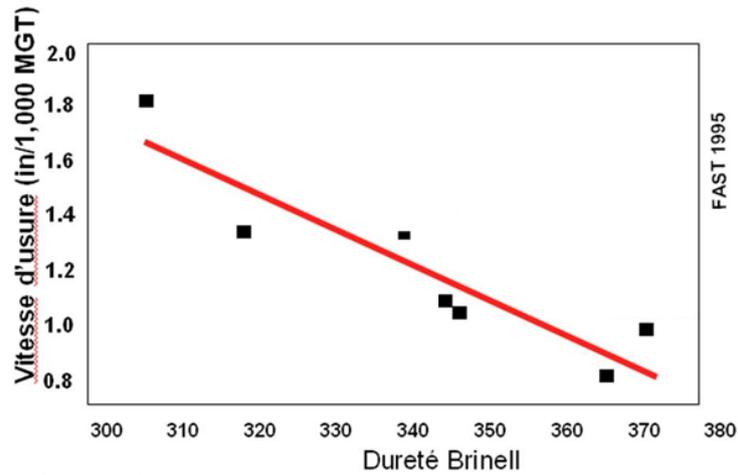


Figure V.1-2 : Relation entre taux d'usure et dureté des nuances d'acier [BOU 04]

Suivant ces critères et d'après le **Tableau V.1-1**, il serait donc classiquement attendu que la nuance R200 présente des taux d'usure plus importants que la nuance R260 du fait sa faible dureté. Il est également attendu que l'usure de la nuance B360 soit limitée à la fois grâce à sa dureté importante et à la finesse de sa microstructure (le volume de chaque particule détachée est ainsi très faible).

- Compétition usure/fatigue :

Ainsi, les phénomènes d'usure et de fatigue de contact agissent simultanément à l'interface roue/rail. Ils sont pilotés par les mêmes paramètres et sont la conséquence des conditions mécaniques et thermiques de contact (**I.2.1.2** et **I.2.2**). On parle de compétition usure/fatigue. Schématiquement (**Figure V.1-3**), trois cas peuvent se produire.

1. Le taux d'usure est très élevé, la matière est éliminée avant qu'elle n'atteigne son potentiel de ductilité, l'initiation de fissure n'a pas lieu et le phénomène de fatigue du matériau reste masqué.
2. Le taux d'usure n'est pas suffisant pour empêcher l'initiation de fissure, mais la quantité de matière enlevée à chaque cycle est plus rapide que la vitesse de propagation des fissures. La fissure est alors éliminée avant d'atteindre une taille critique. Les phénomènes d'usure et de fatigue cohabitent.
3. Le niveau d'usure est très faible et n'empêche ni l'initiation et ni la propagation des fissures. Seul le mécanisme de fatigue est donc visible.

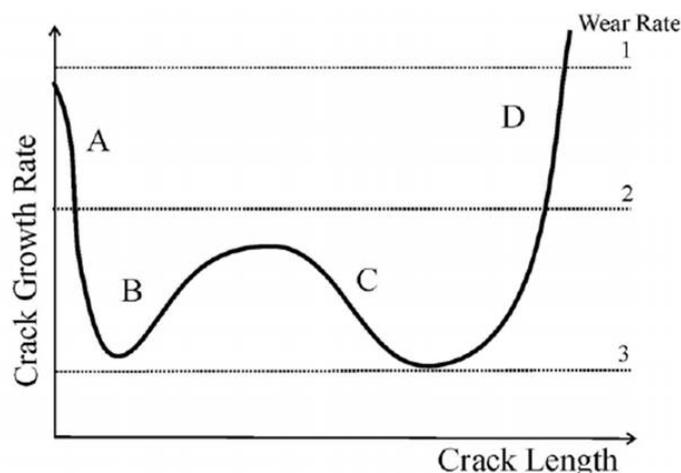


Figure V.1-3 : Compétition entre croissance de fissures et taux d'usure [RIN 05]

L'optimum économique et industriel se situerait aux alentours du cas n°2, l'usure modérée évitant le renouvellement prématuré de rails touché par la fatigue. Cet optimum est extrêmement complexe à obtenir sur tout un réseau, tant les variables à prendre en compte pour chaque phénomène sont nombreuses. Aujourd'hui en France, et plus généralement dans le monde, les nuances d'acier utilisées ont plutôt tendance à favoriser un taux d'usure faible. Les réseaux font donc face à une augmentation importante des apparitions de fissures de surface par fatigue. En attendant d'aboutir à des nuances d'acier permettant le juste équilibre usure/fatigue, l'usure est donc obtenue « artificiellement » par des politiques de meulage préventif du rail à la recherche du « taux d'usure magique » [WOR 86, KAL 97, SRO 03], consistant à éliminer les amorces de fissures juste après leur initiation. Malgré ces politiques de maintenance préventive, la complexité des mécanismes mis en jeu et la variabilité des conditions de contact sur toute une ligne nécessiterait d'opérer au cas par cas. Dans la réalité, en voie, cette réponse adaptée de la politique de maintenance n'est pas toujours atteinte et l'équilibre usure/fatigue peut donc basculer d'un côté ou de l'autre.

Pour mieux comprendre la réponse d'un matériau dans sa globalité, il est donc nécessaire de l'étudier sous trois angles différents : L'usure, l'accommodation plastique et les transformations de phase.

V.1.2.2 R260 (Repère III)

L'évolution des profils pour les files droite et gauche des rails de R260 est présentée dans la **Figure V.1-4**. Elle est estimée à partir de la différence des profils mesurés en 2010 et 2013. Cette différence traduit à la fois la perte de matière par usure et l'accommodation plastique des profils. La valeur obtenue est également très dépendante de la zone choisie pour recalibrer les profils. La zone de recalage choisie pour cette étude correspondant à la joue non active du rail. En effet, cette zone sans contact est supposée peu évoluée et constitue donc la zone de référence la plus fiable disponible. Au final, la différence des profils dans la zone de recalage étant trois fois supérieure à la précision du profilomètre (environ 50 μ m), les profils sont jugés exploitables pour analyser l'évolution relative au sein d'un même profil.

La différence (suivant la normale à la surface) des profils recalés est présentée sur les deux graphiques du bas de la **Figure V.1-4**, respectivement pour la file gauche et droite. Ces courbes présentent des allures similaires suivant la direction transversale. Les deux indiquent une évolution plus importante de la joue active entre 150 et 200 μ m. On note également qu'au sein d'un même profil cette évolution varie du simple au double et présente plusieurs extremums locaux. Ce constat va dans le sens d'une organisation par bandes longitudinales de la microstructure constatée sur les photographies de surface.

La **Figure V.1-5** présente l'évolution de la morphologie de surface au cours du temps de juin 2010 à décembre 2012. Les stries de meulage disparaissent (soit par usure, soit par plastification du profil) progressivement et ne sont plus visibles sur la bande de roulement principale dès Mai 2011 (J + 1 an). Dès novembre 2010, on observe l'apparition de bandes longitudinales de phases blanches, aussi bien au niveau des joues que du centre de la bande de roulement. La dureté mesurée y est de l'ordre de 530 Hv contre 360 Hv en dehors des zones transformées. Cette phase blanche semble très fortement liée à des bandes de glissement longitudinales au sein desquelles la matière est étalée, phénomène particulièrement visible en octobre 2011, grâce à une légère pluie qui fait ressortir le motif. On note également en octobre 2011, à l'extrémité de la bande de roulement, l'apparition périodique de bleuissement sur le rail. Synonymes d'élévation notable de la température, ils apparaissent à une périodicité

identique à celle des stries de meulage. La légère variation géométrique du profil dû aux facettes de meulage serait donc un lieu propice au glissement des roues. Ces zones de bleuissement participent à la naissance d'îlots de phases blanches extrêmement faïencés qui sont observés lors des visites suivantes (**Figure V.1-6**).

Lors de la dernière visite en juillet 2013, chacun des motifs observés en 2009 (**II.2.2.2**) est de nouveau observable. La **Figure V.1-7** montre le motif périodique qui apparaît du côté de la joue non active et à proximité d'un morcellement de la phase blanche sous forme d'îlots de $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$. Au centre de la bande de roulement, on retrouve un faïencage sous forme de bandes transversales.

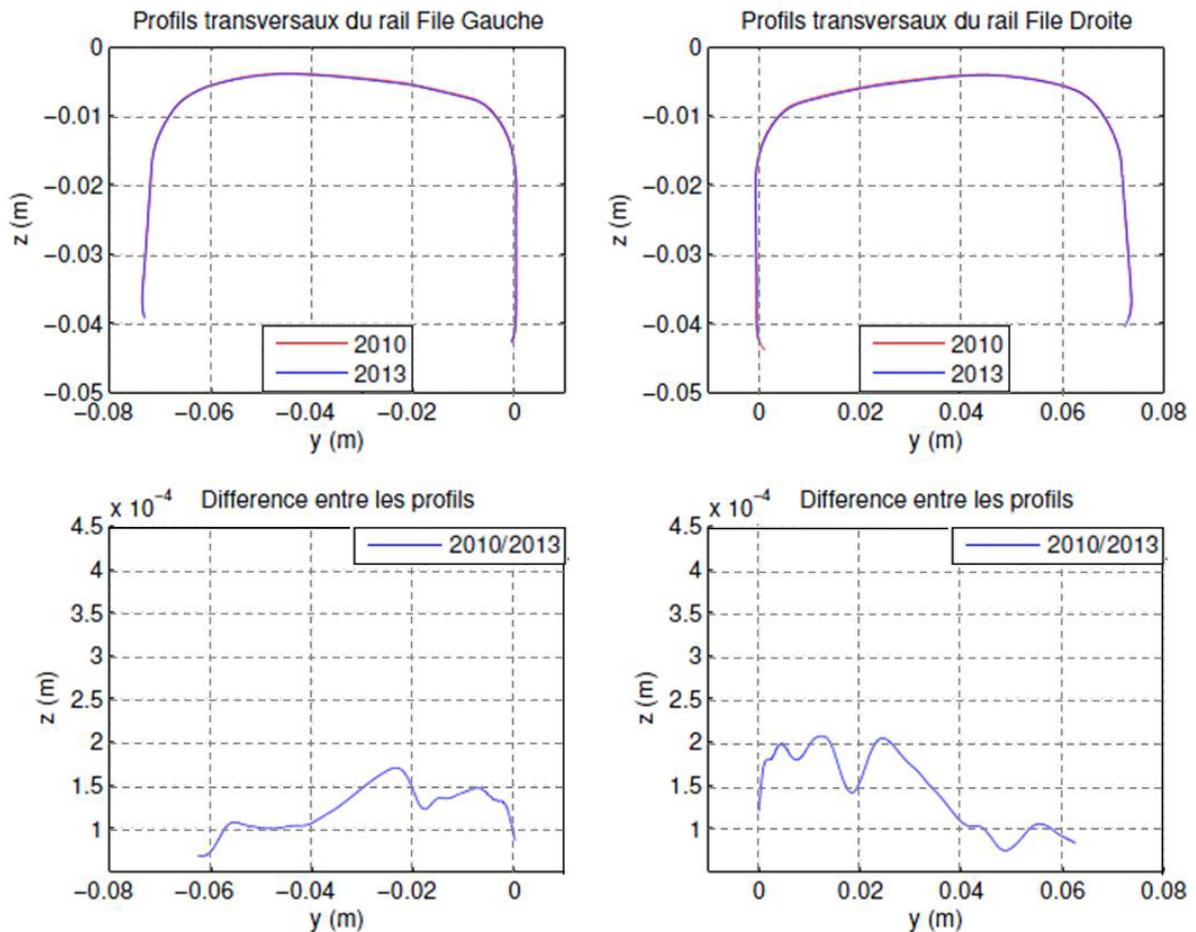


Figure V.1-4 : Comparaison des profils sur le rail R260 et calcul de l'usure entre 2010 et 2013

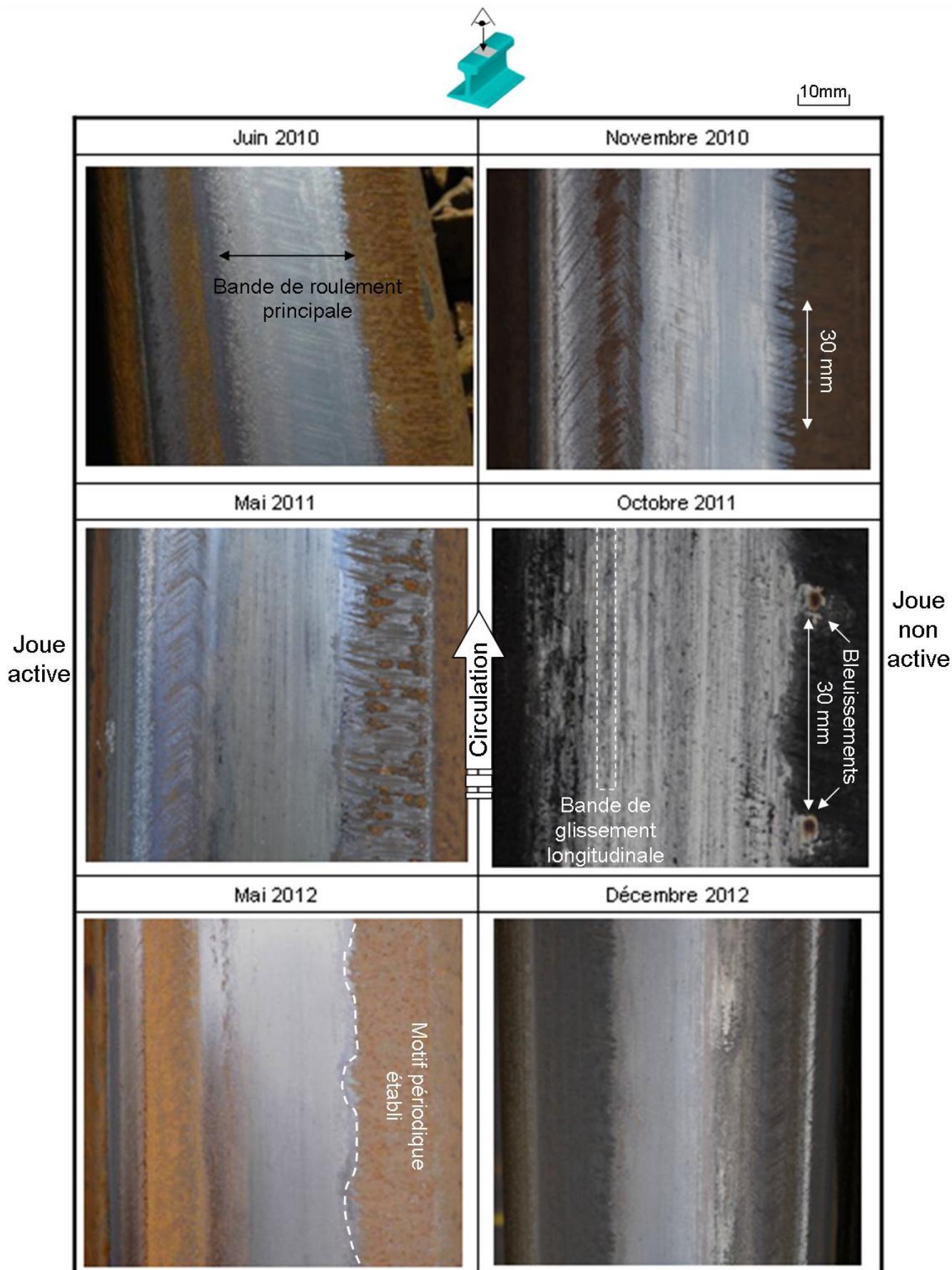


Figure V.1-5 : Evolution de l'aspect de surface de la nuance d'acier perlitique R260

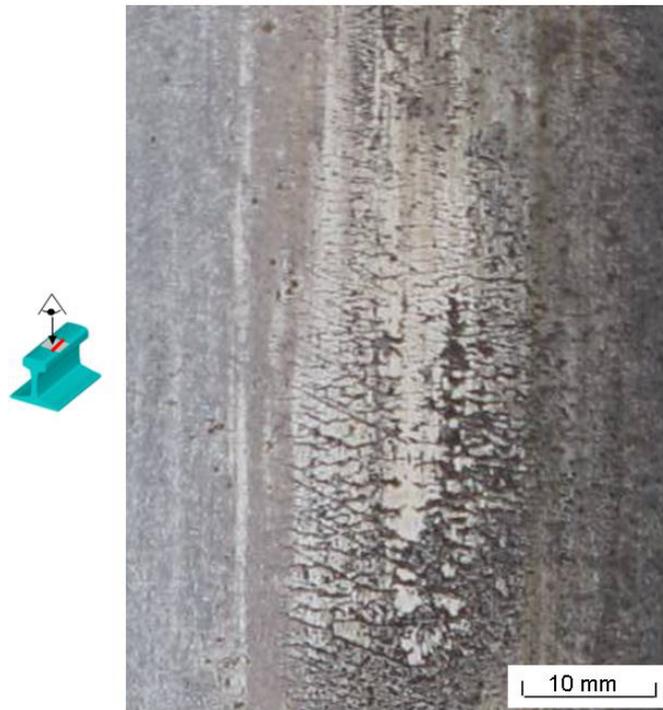


Figure V.1-6 : Ilot de phase blanche formé sous bleuissement

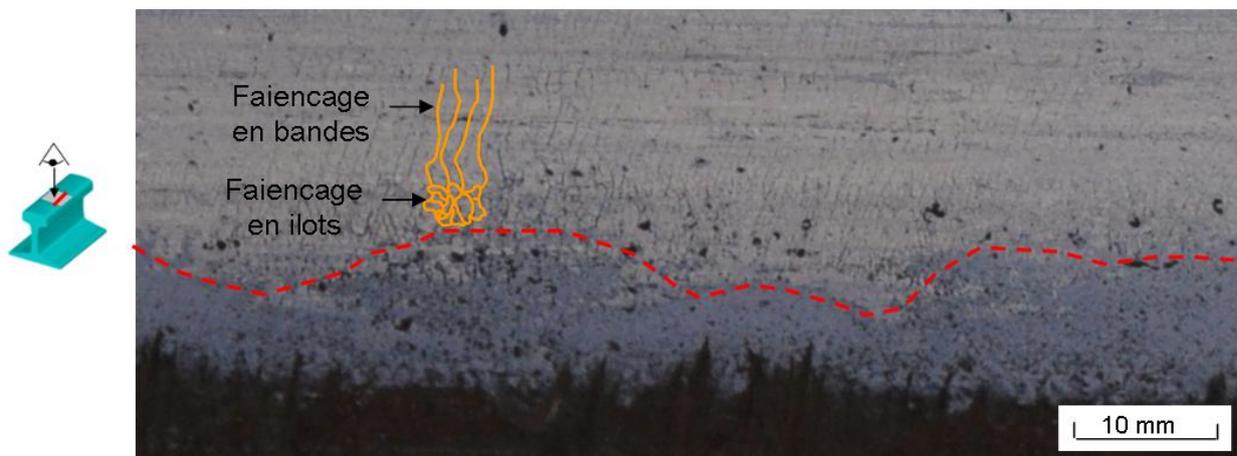


Figure V.1-7 : Phase blanche sous forme de faiencage suivant un phénomène périodique

V.1.2.3 R200 (Repère II)

La nuance R200 montre une évolution géométrique (d'environ 300-400 μ m) plus importante et plus homogène le long du profil transversal que la nuance R260. Ce constat est à lier à la fois à sa dureté plus faible et à sa limite d'élasticité plus faible.

Les courbes d'évolution des profils (**Figure V.1-8**) sont de nouveau symétriques entre les files droite et gauche mais présentent un maximum légèrement décentré vers l'extérieur de la voie contrairement à la nuance R260. En supposant une plateforme identique et une pose similaire des deux rails, on constate donc que par l'évolution de son profil, une nuance d'acier a une influence non négligeable sur la localisation du contact.

Il est également intéressant de remarquer que les rails présentent une évolution quasi-identique le long du profil excepté sur une bande côté joue active qui semble moins fréquemment en contact. D'après la photo de Juin 2010 de la **Figure V.1-9**, cette bande de faible évolution peut également s'expliquer par le meulage initial qui a retardé le contact dans cette zone, ce qui se traduit par la formation d'une bande d'oxyde.

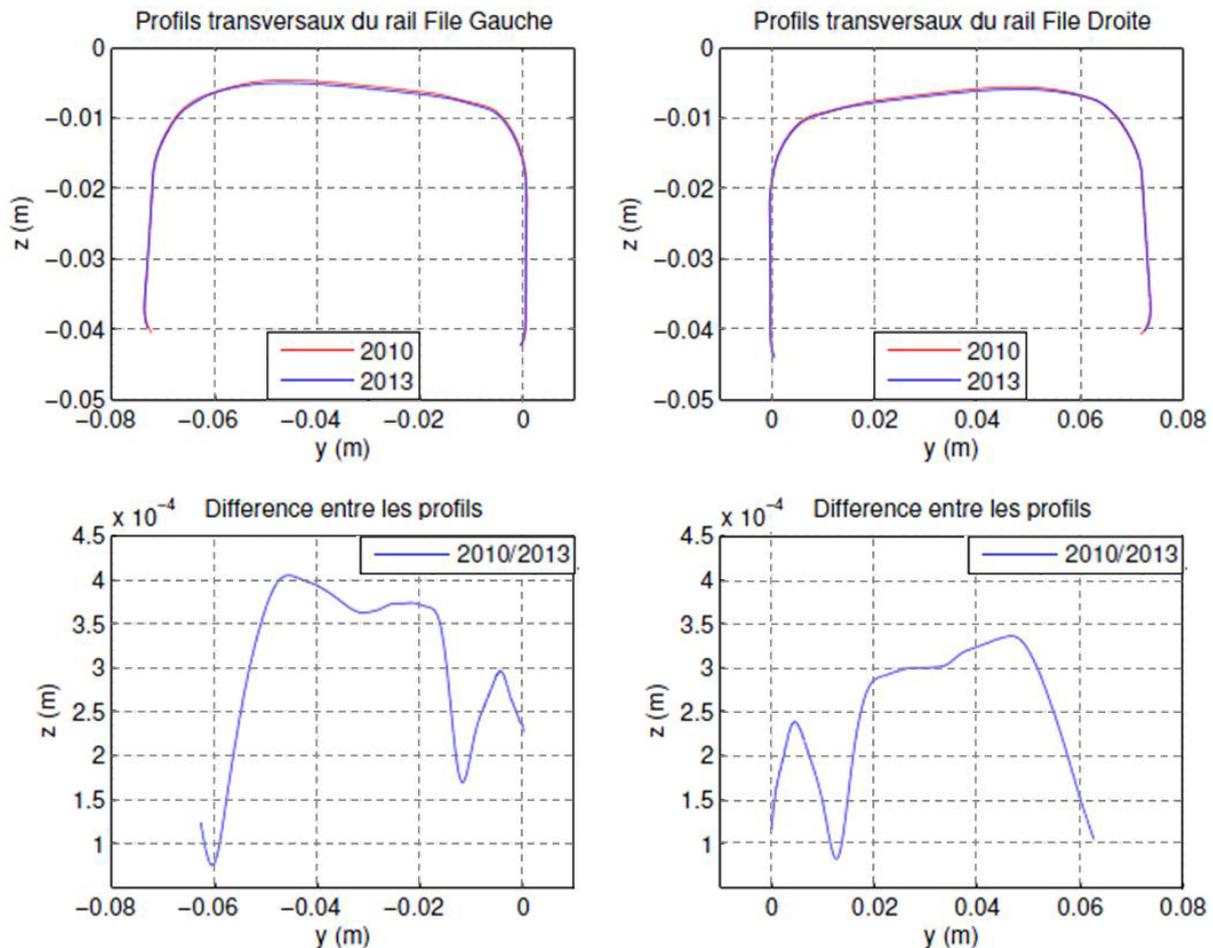
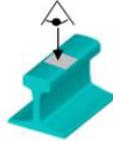


Figure V.1-8 Comparaison des profils sur le rail R200 et calcul de l'usure entre 2010 et 2013

Les observations de surface (**Figure V.1-9**) confirment adaptation plastique du profil plus rapide dans le cas de la R200. La bande de roulement s'élargit fortement dès novembre 2010 (J + 6 mois) et les stries de meulage ne sont déjà plus visibles. La bande de roulement apparaît donc plus homogène, mais petit à petit de fines bandes de glissement laissent supposer la présence de phase blanche de manière très parcellaire aux extrémités transversales de la bande de roulement. Les mesures de dureté confirment une dureté de 360 Hv dans ces zones contre 270 Hv en dehors de ces zones traduisant la présence de phase blanche. L'aspect discontinu de cette phase blanche pourrait s'expliquer soit par un faible niveau de transformation, soit par un important détachement régulier de matière par usure. Cependant, un faible niveau de transformation apparaît peu probable au vu de la plasticité de ce matériau et de son taux de carbone, qui le disposent à de fortes transformations de phase (**III.1.3.1**).



10mm

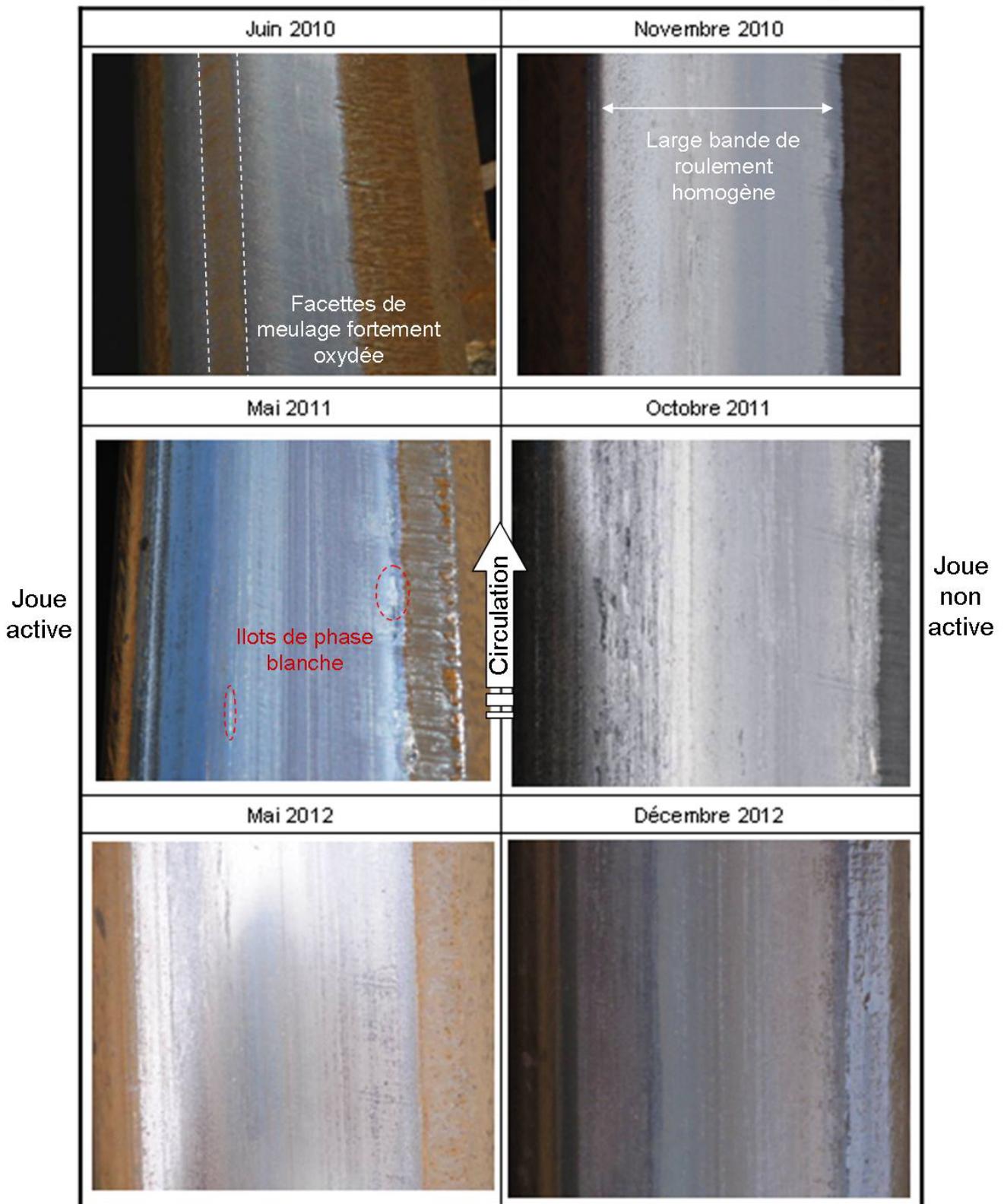


Figure V.1-9 : Evolution de l'aspect de surface de la nuance d'acier perlitique R200

V.1.2.4 B360 (Repère IV)

L'évolution des profils (due à l'accommodation plastique et à l'usure) d'environ 250 μ m de la bainite B360 présentée dans la **Figure V.1-10**, la place entre celles des nuances R200 et R260 (**Figure V.1-11**). Comme sur la nuance R200, la différence des profils pris en 2010 et 2013 est plus importante du côté de la joue non active. De plus, elle présente plusieurs maxima locaux, synonymes d'une usure différentielle et donc potentiellement de bandes longitudinales aux microstructures très différentes.

Au vu de la faible taille de la microstructure et de la dureté élevée de la B360, le taux d'usure de la B360 est supposée faible [BOU 04, DAY 12]. Par conséquent, l'évolution des profils de B360 est donc principalement liée à l'accommodation plastique du matériau. Cette quasi-absence d'usure rend le cycle d'évolution du profil plus long que sur les autres nuances plus ductiles (R200/R260). Ainsi, il est visible sur la **Figure V.1-12** que la bande de roulement s'élargit très peu et que les stries de meulage persistent jusqu'en 2012. Cette potentielle capacité à s'accommoder plastiquement de la nuance B360 semble cohérent avec son élongation à la rupture (**Tableau V.1-1**), $A=13\%$, ce qui la place plus proche de la nuance R200 ($A=14\%$) que de la nuance R260 ($A=10\%$).

Ce long cycle d'évolution géométrique du profil entraîne une localisation du contact au niveau des facettes de meulage et provoque la formation d'îlot de phases blanches qui apparaissent en surépaisseur à l'œil et au toucher (**Figure V.1-13**). Au fur et à mesure des visites de novembre 2010 à octobre 2011, la phase blanche semble s'étaler vers le centre de la bande de roulement avec une couleur cuivrée différente de son aspect original. Il est cependant intéressant de relever que la dureté moyenne varie entre les îlots et la phase blanche présente au centre de la bande de roulement, atteignant respectivement des valeurs de 530 Hv et 610 Hv. La nature de ces phases blanches sera explorée plus en détail dans la partie suivante.

En Mai et Décembre 2012, ces îlots de phases blanches se détachent progressivement sous forme de languettes de fines épaisseurs (**Figure V.1-14**) et semblent disparaître de la surface du rail. En juillet 2013, les îlots de phases blanches se sont de nouveau étalés et semblent avoir entamé un nouveau cycle de formation.

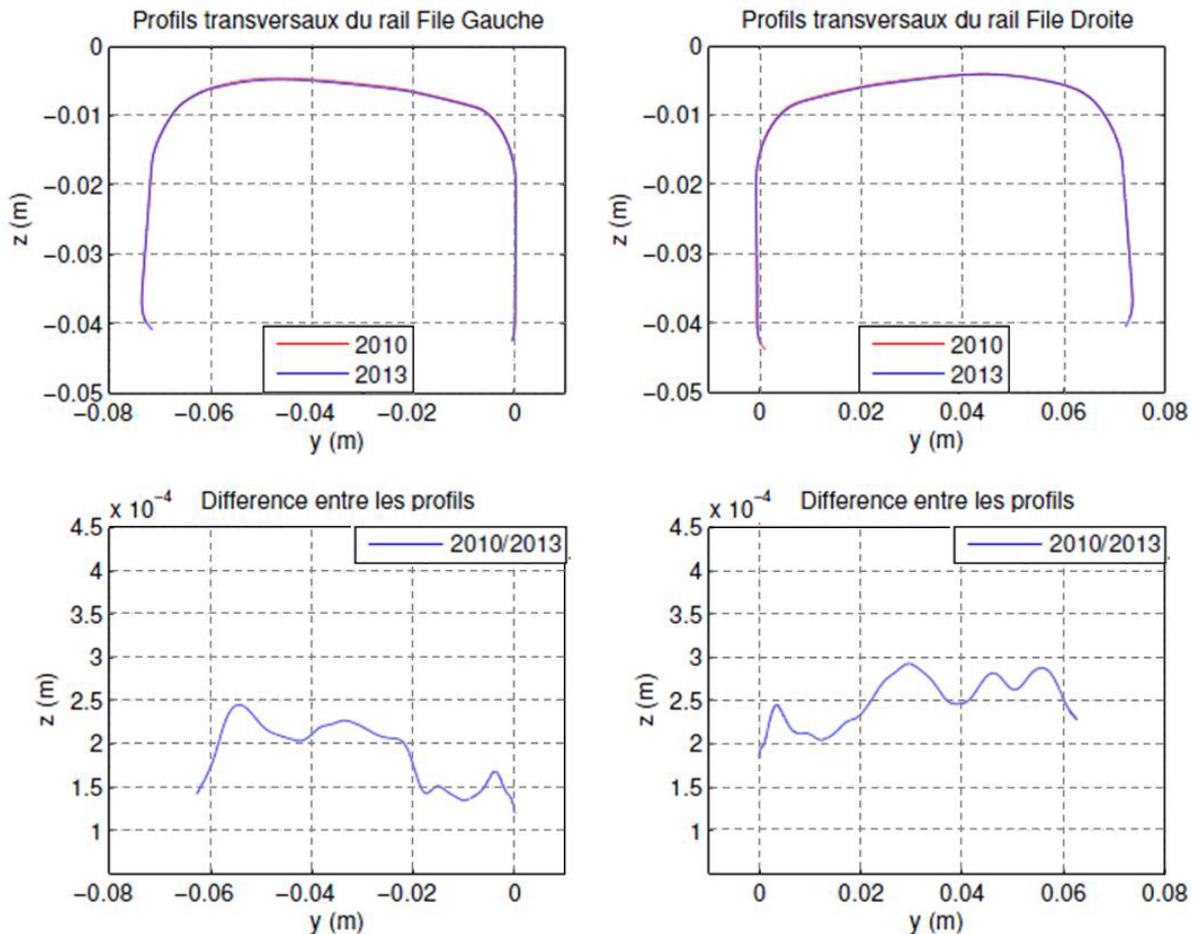


Figure V.1-10 : Comparaison des profils sur le rail B360 et calcul de l'usure entre 2010 et 2013

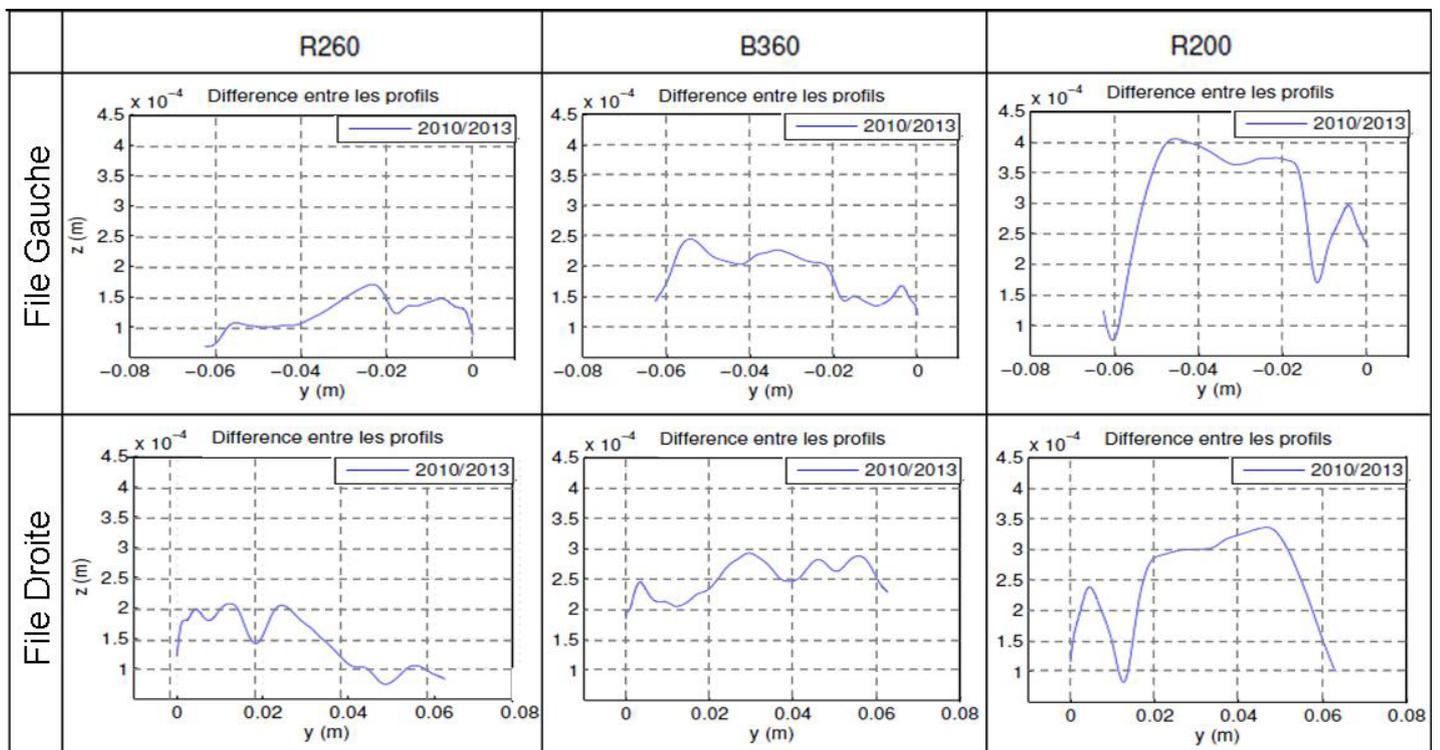
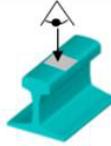


Figure V.1-11 : Evolution des profils sur les différentes nuances d'acier à rail



10mm

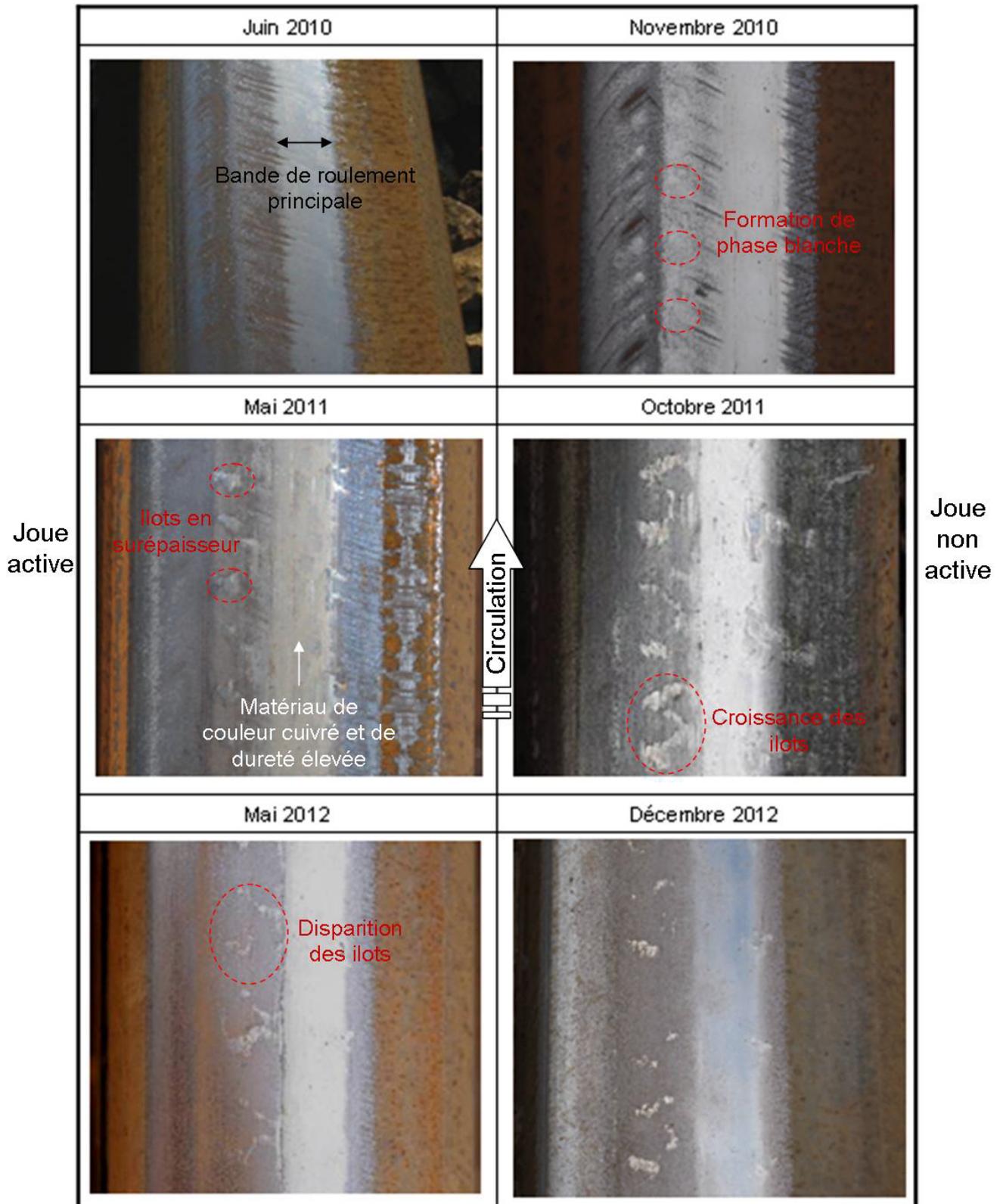


Figure V.1-12 : Evolution de l'aspect de surface de la nuance d'acier bainitique B360 de juin 2010 à décembre 2012



Figure V.1-13 : Îlot de phase blanche en périphérie de la bande de roulement sur la nuance B360



Figure V.1-14 : Délaminage des îlots de phase blanche sous forme de languettes

V.1.2.5 Synthèse

Le suivi périodique de la zone d'essai a permis de mettre à jour une réponse spécifique pour chacune des nuances (**Tableau V.1-3**), autant en termes de transformations superficielles, que de d'usure des profils et d'accommodation plastique. Pour confirmer la présence et la nature de ces phases blanches, plusieurs prélèvements sont effectués et analysés en laboratoire.

	Usure	Accommodation plastique	Phases blanches	
			Au centre	En périphérie
R200	●●●	●●●	◡	◡
R260	●	●◡	●●●	●●●
B360	◡	●●	●	●●●

Tableau V.1-3 : Synthèse de la réponse tribologique des nuances d'acier
(● : faible intensité, ●●● : forte intensité)

V.1.3 Etat de la microstructure sous surfacique à 3 ans

Suite à l'émergence de phase blanche sur les différentes nuances, plusieurs échantillons de R260 et de B360 ont été prélevés (**Figure V.1-1**). Plusieurs coupes transversales et longitudinales ont alors été effectuées pour étudier l'évolution de la microstructure sous la surface. Les coupes longitudinales sont situées au centre et aux extrémités de la partie la plus brillante de la bande de roulement (**Figure V.1-15**). Cette partie brillante est liée à une fréquence de contact élevée et la présence de phase blanche (**II.2.2**). Les principaux résultats des observations réalisées sur ces coupes sont dévoilés dans cette partie.

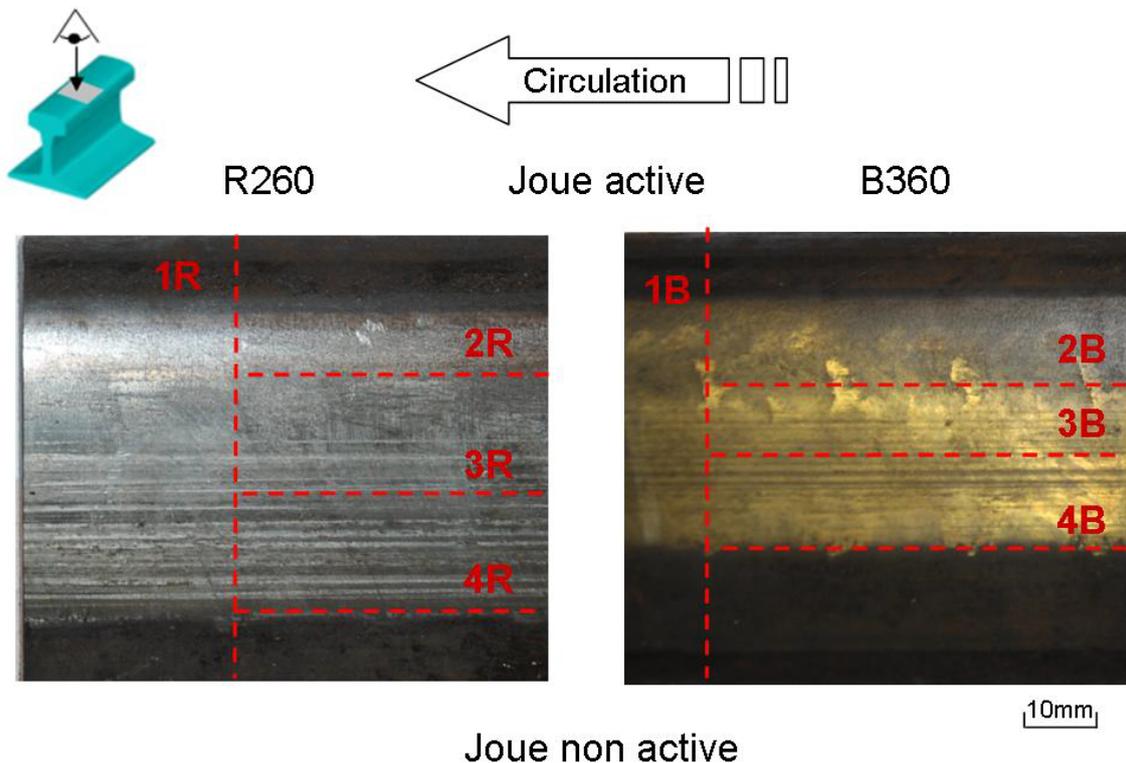


Figure V.1-15 : Localisation des coupes sur les échantillons extraits de la zone d'essais

V.1.3.1 R260 : Observations des coupes cristallographiques

- Au centre de la bande de roulement :

Comme sur l'échantillon prélevé et étudié en fin d'année 2009 (**II.2.2**), le centre de la bande de roulement est recouvert d'une couche uniforme et continue de phase blanche d'une épaisseur d'environ 20 μm (**Figure V.1-16a**).

Sous cette couche de phase blanche, les grains de perlite sont extrêmement écrasés, jusqu'à devenir difficilement discernables sur une profondeur de 200 μm . On observe également une orientation importante de la matière dans le sens opposé à la circulation. En phase d'accélération, la roue « prend appui » sur le rail et « extrude » la matière dans la direction opposée au sens de circulation (**Figure IV.3-9**). Le centre de la bande de roulement est donc le siège d'un effort normal important et d'un fort cisaillement de la matière pouvant expliquer la formation de phase blanche de « manière mécanique » (**III.1.3.1**).

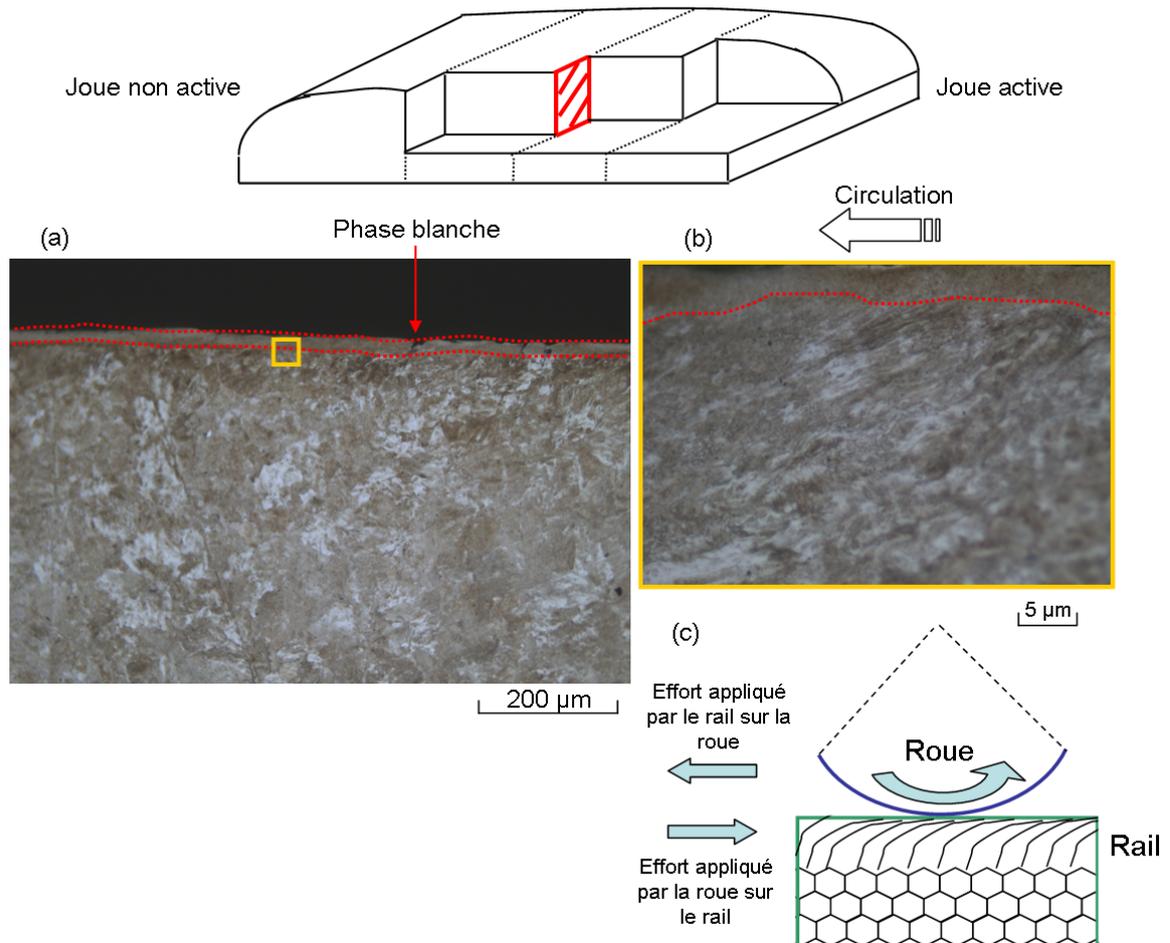


Figure V.1-16 : Coupe longitudinale au centre du rail R260, (a) Phase blanche continue, (b) Ecroûssage et réorientation de la matière

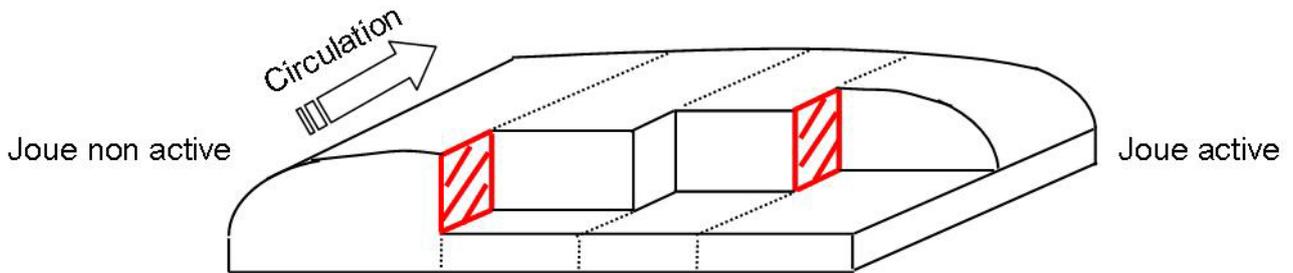
- En périphérie de la bande de roulement :

Au contraire, en périphérie de la bande de roulement, on observe une microstructure non-observée sur la zone d'étude de 2009 (**Figure V.1-17**). À proximité de chaque joue du rail, on note une alternance de microstructure avec et sans phase blanche. Dans les deux cas, il n'y a ni écroûssage, ni orientation des grains de perlite sous la surface.

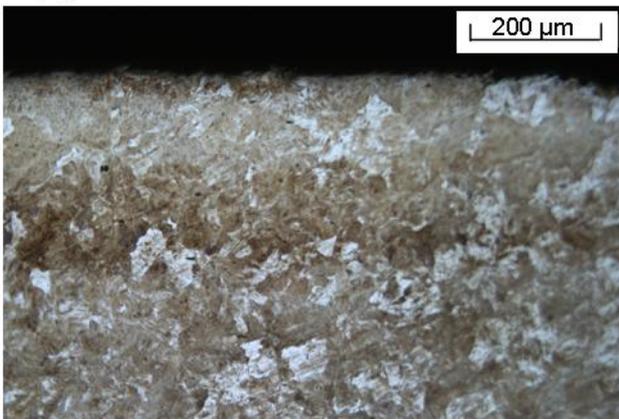
De plus, pour le motif présentant de la phase blanche, on distingue une frontière nette sous forme d'arcs de cercle entre phase blanche et substrat. La présence de lamelles de cémentite non dissoute à proximité de l'interface est également confirmée par des observations à forts grossissements (**Figure V.1-17c**). Enfin, cette phase blanche n'est pas homogène et présente une morphologie par strates qui apparaissent plus ou moins blanches au microscope et dont le nombre et les épaisseurs varient suivant le point d'observation (**Figure V.1-17b et 16c**). Cet effet apparaissant quelque soit le temps d'exposition au Nital. Ce n'est donc pas un artefact de préparation de l'échantillon. Cet effet est bien à lier à la nature de la microstructure et non aux traitements que l'échantillon subit avant analyse. L'absence des marqueurs de déformation de la microstructure et la forme générale de la couche de phase blanche conduit à supposer une formation thermique de la phase blanche pour ces îlots (**III.1.3.3**).

Il faut également remarquer sur ces observations, la grande densité de fissures (tous les 100-200 μm) qui s'initient à la surface de la phase blanche. Au sein de la phase blanche, avant l'interface avec le substrat de perlite, la propagation est quasiment normale à la surface. A la jonction avec le substrat, trois cas de propagation sont observés :

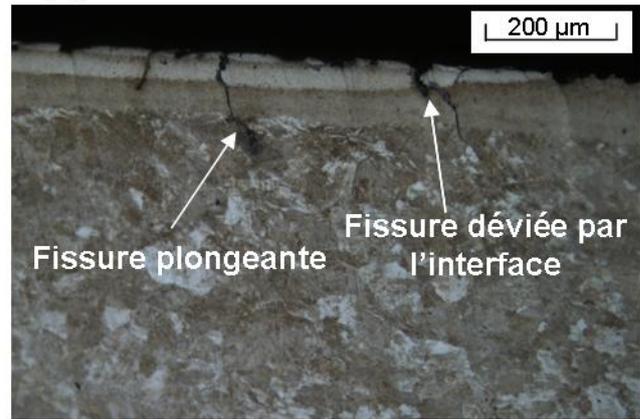
- La propagation semble s'arrêter
- La propagation continue en suivant l'interface phase blanche / perlite.
- La propagation se poursuit au sein de la perlite.



(a)



(b)



(c)

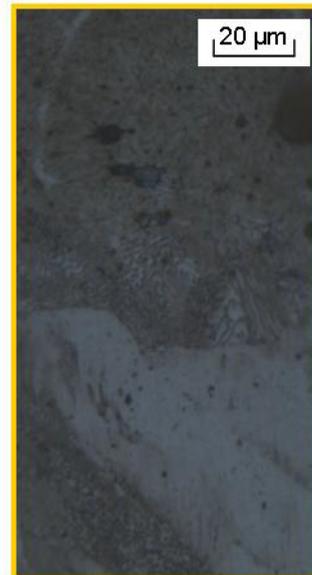
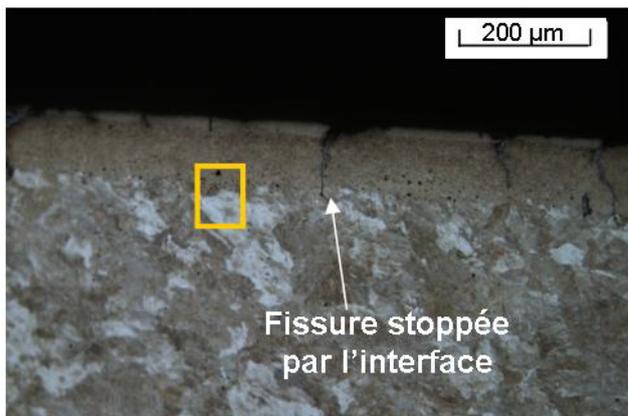


Figure V.1-17 : Coupes transversales sur R260 avec alternance de motifs, (a) Motif sans phase blanche, (b) Motif avec phase blanche, (c) Motif et vue détaillée

V.1.3.2 B360 : Observations des coupes cristallographiques

- Au centre de la bande de roulement :

Les observations au centre de la bande de roulement du rail B360 montrent une surface très régulière avec peu d'aspérités (**Figure V.1-18**). On note également la présence des aiguilles de bainite, jusqu'au niveau de la surface, ce qui traduit l'absence de transformation de la matière au centre de la bande de roulement. Cependant, l'absence de joints de grains dans la structure bainitique empêche de faire l'analogie entre les observations visuelles et le niveau réel de déformation plastique comme sur les nuances perlitiques. Celui-ci sera déterminé par des analyses EBSD dans la partie suivante.

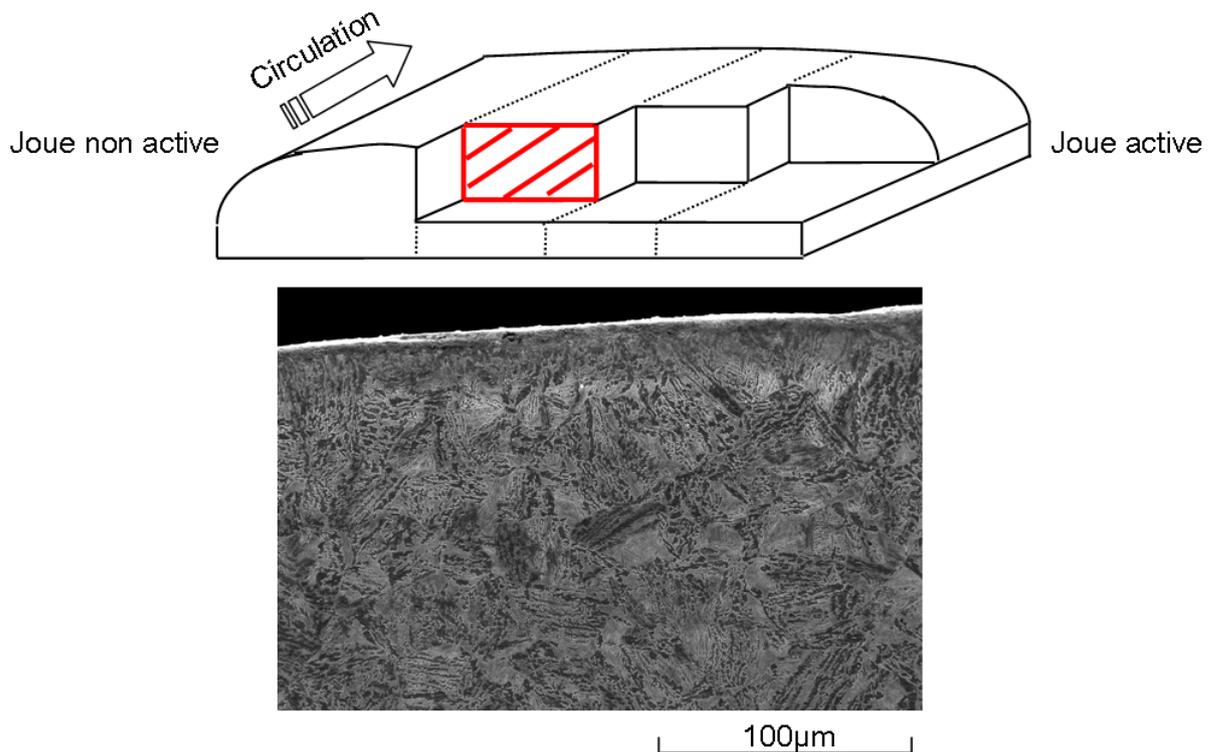


Figure V.1-18 : Coupe transversale au centre du rail B360 observée au MEB

- En périphérie de la bande de roulement :

Comme observée en surface, malgré son faible niveau de carbone, la nuance bainitique produit également une microstructure qui résiste à l'attaque Nital. Par défaut, on l'appellera également phase blanche, même s'il n'est pas établi que sa nature est identique à celle produite sur la nuance R260. Les îlots observés en surface se retrouvent donc sur les observations de coupes sous la forme d'une alternance de motifs : avec et sans phase blanche (respectivement **Figure V.1-19a** et **Figure V.1-19b**).

Comme sur le R260, la phase blanche se présente sous forme de strates qui réagissent plus ou moins à l'attaque Nital (et apparaissent donc plus ou moins blanches). Les observations MEB (**Figure V.1-19d**) montrent que ces strates semblent également être liées à une dissolution progressive des aiguilles de bainite. Très visibles dans le substrat, elles disparaissent au fur et à mesure que les strates s'approchent de la surface. Une nouvelle fois, la disposition en demi-lune et en strates successives amène à supposer un gradient de température important dans la zone et une formation thermique de cette phase blanche.

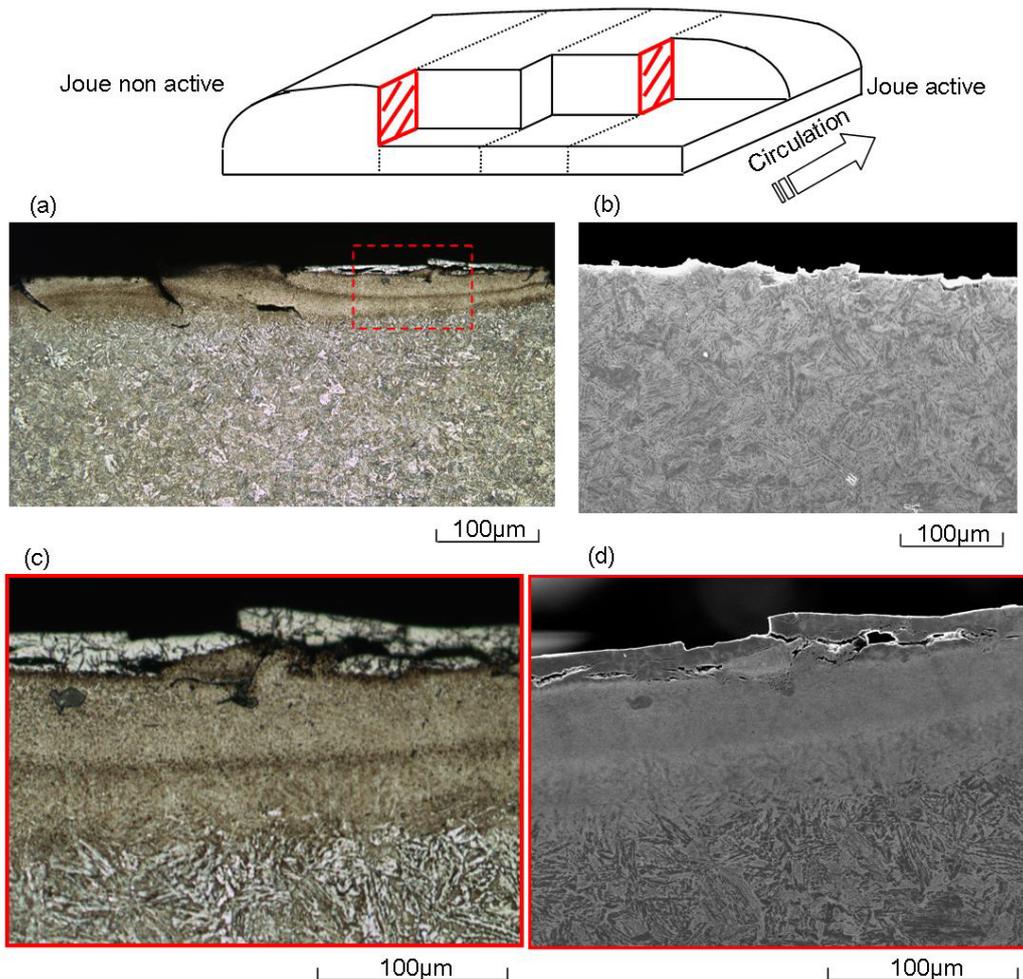


Figure V.1-19 : Coupes transversales sur B360 : Alternance de motifs (a) Avec phase blanche, (b) Sans phase blanche, (c) et (d) vues détaillées de (a) prises respectivement au microscope optique et au MEB

Plusieurs fissures de quelques centaines de micromètres sont également observables le long de la joue non active. Elles s'initient à la frontière des îlots de phase blanche et semblent se propager dans les 3 directions (**Figure V.1-20**).



Figure V.1-20 : B360 : Fissure s'initiant d'un îlot de phase blanche.

Les coupes métallurgiques réalisées sur les échantillons de rails R260 et B360 ont ainsi confirmé la présence de phase blanche, pressentie lors des mesures de dureté réalisées sur site. Cette phase blanche n'est cependant pas homogène, et son mécanisme de formation semble différent suivant la position sur le profil transversal du rail. L'évolution de la microstructure conduit à supposer une formation mécanique au centre et thermique en périphérie de la bande de roulement.

V.1.3.3 Analyses EBSD

Pour confirmer l'existence d'orientations privilégiées de déformations de la matière à la surface de rails, Tatasteel a réalisé des analyses EBSD sur des échantillons de R260 et B360.

- Rail R260 :

Les analyses EBSD permettent d'accéder à la carte de désorientation des grains cristallographiques. On peut ainsi obtenir la distribution de l'angle moyen de désorientation anisotropique (KAM) sur plusieurs millimètres sous la surface. Cet angle fait le lien avec la sollicitation tribologique (voir I.3.1.2).

Par exemple, la **Figure V.1-21** montre l'évolution de cet angle sur une ligne verticale appartenant à la coupe longitudinale côté joue non active (coupe 4R **Figure V.1-15**). Cette courbe présente deux zones où l'angle prend des valeurs importantes (c'est-à-dire où la microstructure subit de grandes déformations) :

- En extrême surface : le système de mesure sature sur une épaisseur de 20 à 50 μm à un angle de plus de 40°. Soit la désorientation dépasse effectivement les 40°, soit le système ne peut plus calibrer une maille cubique dans cette zone : on est en présence de phase blanche. Dans les deux cas, cette situation résulte d'un fort cisaillement local.
- Entre 500 μm et 2500 μm , l'angle passe par un second maximum local, plus faible que le précédent, qui évolue entre 15° et 25°. D'après les calculs effectués par Johnson [JOH 85], cette zone correspond à la répartition des contraintes dans le rail et à la localisation du maximum du critère de Von Mises en fonction du rapport entre les efforts de cisaillement (T) et l'effort normal (N).

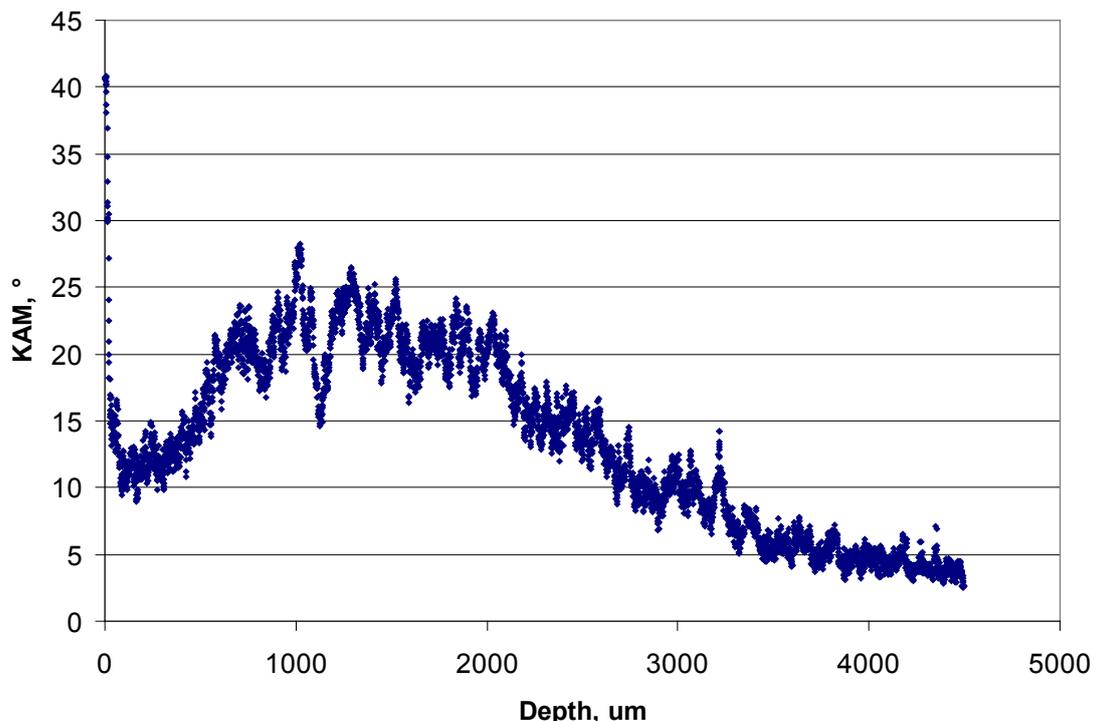


Figure V.1-21 : Angle moyen de désorientation des grains en fonction de la profondeur sur une ligne verticale appartenant à la coupe 4R

Les 4 mesures réalisées le long du profil transverse semblent montrer que la localisation de cette seconde zone (comprise entre 500 et 2500 μm sous la surface) est variable suivant la position transversale (**Figure V.1-22**). Cette zone de déformation semble passer par un maximum du côté de la joue non active aussi bien en termes de valeurs de l'angle que d'étendue dans la profondeur.

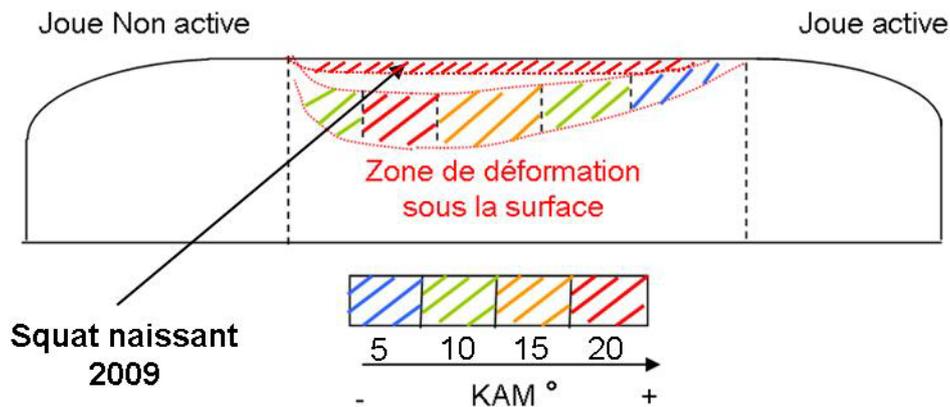


Figure V.1-22 : Schématisation de la désorientation des grains sous la surface du rail R260

Cette zone est très similaire au lieu d'amorçage des fissures de squats observés en 2009 (**Chapitre II**). La localisation et l'intensité de la zone de déformation étant liées au rapport T/N, le lien entre cette position et l'amorçage du squat indique que celui-ci est également spécifique à des conditions de contact particulières susceptibles d'engendrer une réponse unique du matériau.

- Rail B360 :

La **Figure V.1-23** montre l'évolution de l'angle de désorientation sur une ligne verticale appartenant à la coupe longitudinale côté joue non active du rail B360 (coupe 4B **Figure V.1-15**). Cette courbe est directement comparable à celle de la **Figure V.1-21**.

On note des valeurs moyennes beaucoup plus importantes que pour le rail perlitique pour l'ensemble de la courbe. La finesse des aiguilles de bainite semble faciliter leur réorientation comparée aux grains plus « massifs » de perlite, ce qui peut expliquer cette différence. L'évolution de l'angle est par contre plus continue dans le cas de la B360 et présente moins de maximums locaux. Il est possible d'en déduire que le gradient de microstructure sera donc moins important au sein de l'acier bainitique pour deux grains côte à côte.

Les spécificités de la microstructure de la bainite (finesse et absence de joints de grains) semblent en faciliter la réorientation et la rendre plus homogène (mouvement d'ensemble) (**Figure V.1-24**). Ces propriétés pourraient être intéressantes pour lutter contre la formation de phase blanche de manière mécanique.

Pour les deux nuances de rails, l'angle moyen de désorientation diminue en périphérie de la bande de roulement. Le cisaillement de la matière y est donc moins important. Ce constat confirme que la présence de phase blanche dans ces zones ne peut pas être due uniquement aux efforts mécaniques, comme observé dans les parties **V.1.3.1** et **V.1.3.2**.

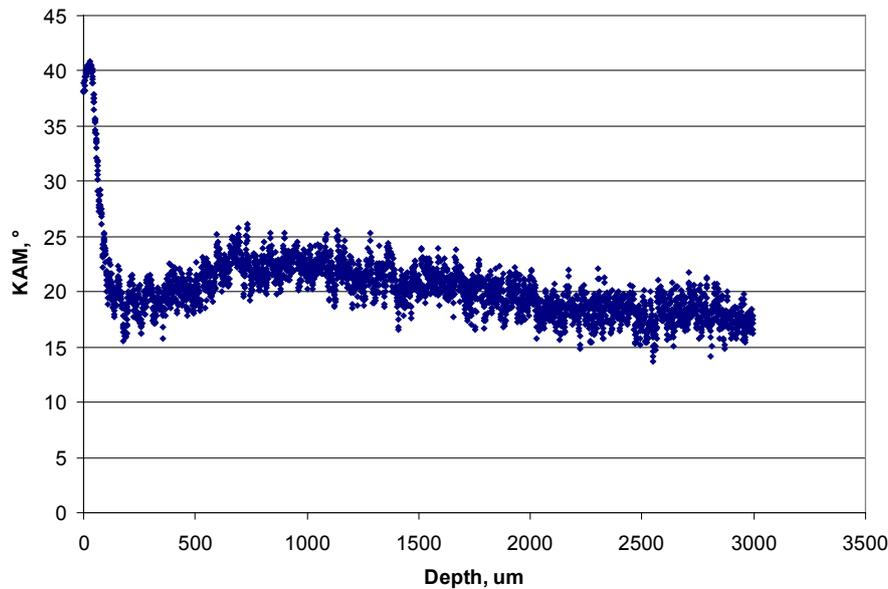


Figure V.1-23 : Angle moyen de désorientation des grains en fonction de la profondeur sur une ligne verticale appartenant à la coupe 4B

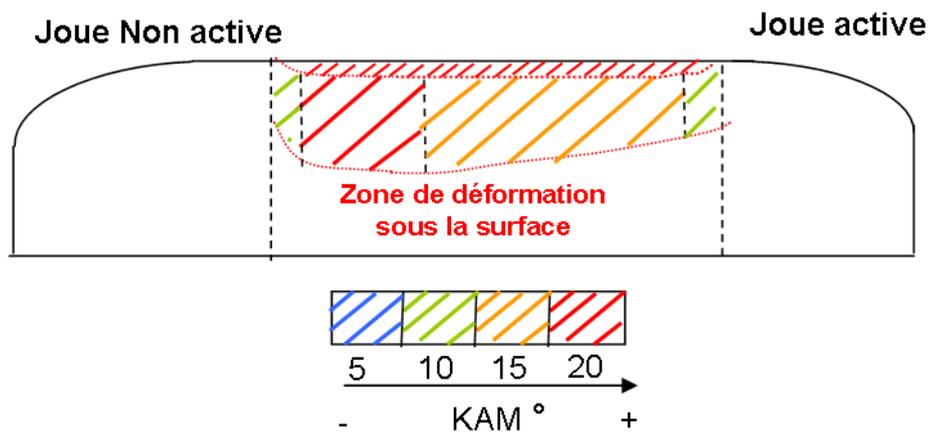


Figure V.1-24 : Schématisation de la désorientation des grains sous la surface du rail B360

V.1.3.4 Bilan des observations

Pour les mêmes conditions de circulation et le même tonnage quotidien, l'évolution de chaque nuance est spécifique en termes de déformation plastique, d'usure et de formation de phase blanche.

Si après 3 ans d'essai, aucune amorce de squat n'a été détectée sur la zone, la microstructure de la nuance d'acier R260 tend à ressembler à celle étudiée en 2009 (II.2.2.3). On retrouve une organisation de la microstructure par bandes longitudinales caractérisées par une morphologie de phase blanche et orientation particulière du substrat perlitique. Cependant, l'origine de la phase blanche ne semble pas homogène le long du profil transversal, et présente d'ailleurs des duretés différentes selon leur localisation. Au centre de la bande de roulement, l'orientation des lamelles de cémentite, la réduction de la taille des grains et la diminution de l'espace inter lamellaires sont autant d'indices à une formation mécanique de la phase blanche. Aux extrémités transversales de la bande de roulement, ces marqueurs au sein de la microstructure n'existent pas. Au contraire, la frontière nette avec le substrat, la présence des lamelles de cémentite à proximité et la morphologie en arc de cercle sont semblable aux phases blanches créées thermiquement [CAR 05, FLE 13].

En étudiant la surface du rail bainitique, il semble évident que ces îlots de phases blanches sont liés à la périodicité des stries de meulage. Les facettes de meulage semblent avoir localisé différemment le contact et perturbé les conditions des contacts. Une analyse du rail non meulée est nécessaire pour valider ou infirmer ces hypothèses.

Le bilan des observations (**Tableau V.1-4**), et en particulier la présence de phases blanches thermiques remet en partie en cause le scénario d'initiation proposé dans la partie **III.2.1** : L'origine thermique d'une partie des phases blanches est-elle nécessaire à la formation d'un fort gradient de microstructure ?

	Usure	Accommodation plastique	Phases blanches	
			Au centre	En périphérie
R200	●●●	●●●	◄	◄
R260	●	●◄	●●●	●●●
B360	◄	●●	●	●●●

Tableau V.1-4 : Synthèse de la réponse tribologique des nuances d'acier testées

(● : faible intensité, ●●● : forte intensité, Bleu : Formation mécanique, Rouge : Formation thermique)

Il devient donc nécessaire de savoir si la microstructure par bandes est principalement issue des efforts mécaniques mesurés durant l'essai IRR. Cependant, cette distinction est difficile à faire sur une voie ferrée réelle car de nombreux phénomènes s'entremêlent dont la plupart sont subis et non contrôlés. Plusieurs essais sur bancs sont donc réalisés au sein du LaMCoS.

V.2 Essais élémentaires

En parallèle aux travaux exposés précédemment, d'autres essais ont été menés au sein du LaMCoS afin de reproduire les conditions équivalentes au cas du contact roue/rail dans un environnement contrôlé. L'objectif est de mieux comprendre la réponse tribologique de l'acier à rail R260, notamment, valider la possibilité d'une origine mécanique des phases blanches observées sur le rail. Deux essais ont ainsi été réalisés, l'un sur une machine bi-disques de fatigue et l'autre sur le banc d'essai RHEOS appliquant des conditions couplées de pression et de torsion à un corps d'épreuve. Ces deux essais complémentaires explorent la réponse du matériau à deux échelles différentes et dans des cas dynamiques et quasi-statiques. Seuls les résultats de ces essais en rapport avec le travail de thèse seront décrits dans cette partie. Le détail de ces essais pourra être trouvé respectivement dans [HAL 12] et [ZIT 12].

V.2.1 Essais Bi-disques

Le premier objectif de cet essai est d'identifier les sollicitations mécaniques nécessaires à la formation de phase blanche, en particulier en termes d'efforts de cisaillement entre la roue et le rail. Le second est de juger l'influence de ces conditions sur la morphologie de la phase blanche créée. Ce travail a été réalisé par Sarah Zitouni au LaMCoS et un commentaire supplémentaire de ces essais pourra être trouvé dans [ZIT 12].

V.2.1.1 Détails du dispositif expérimental

- Description de la machine bi-disques :

Pour explorer l'interface roue / rail dans une version simplifiée mais contrôlée, il a été décidé d'utiliser une machine bi-disques de fatigue (**Figure V.2-1**). Deux disques sont mis en contact et entraînés en rotation à la même vitesse ω (1500 tours/minute). Une charge verticale (Q), calculée en fonction de la géométrie et du matériau utilisé, est appliquée par un vérin pneumatique pour obtenir la pression maximale de Hertz équivalente au contact roue/rail. Dans notre cas, un glissement entre les deux disques est imposé géométriquement en jouant sur les rayons $R1$ et $R2$ des galets. Après simplification, le glissement γ est donc donné par la relation :

$$\gamma = \frac{R1 - R2}{R1 + R2} \quad (5.1)$$

De plus, en retirant un jeu de courroies pour n'entraîner qu'un seul des deux disques, il est possible d'obtenir un contact dans des conditions de roulement sans glissement avec $\gamma = 0\%$.

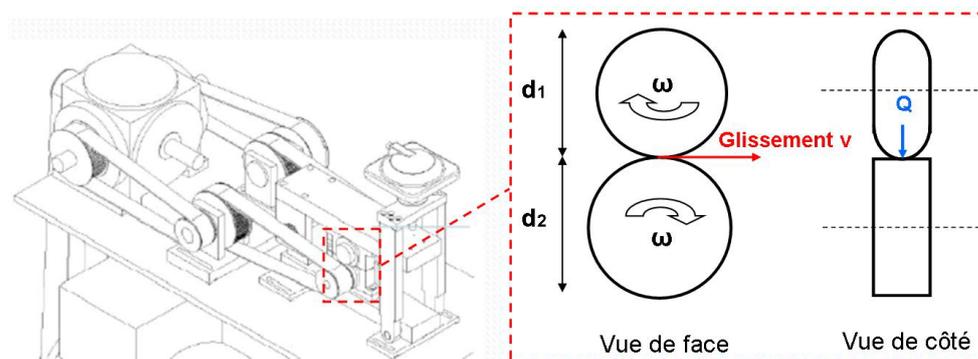
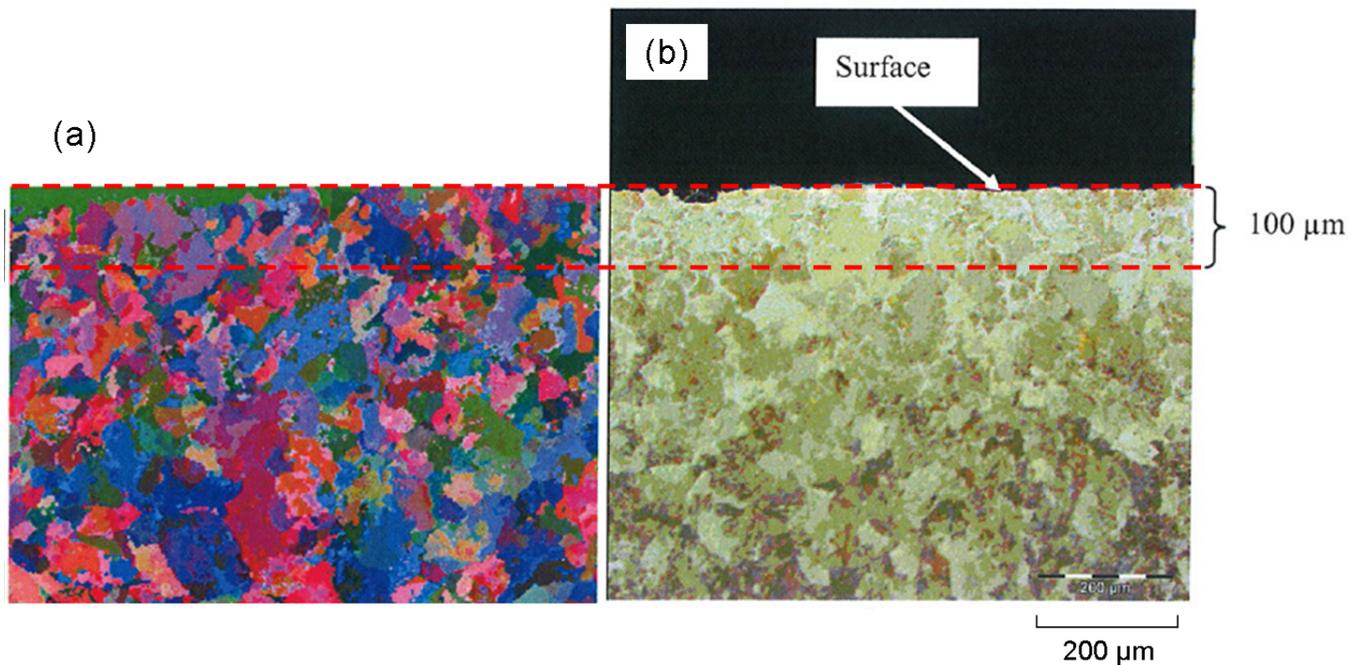


Figure V.2-1 : Schéma de principe du fonctionnement de la machine bi-disques

- Caractéristiques des galets :

Les galets utilisés sont en acier R260 et extraits de contre-rails dont les dimensions géométriques permettent de s'assurer de l'homogénéité de la structure cristalline en s'éloignant de plusieurs millimètres de la surface. En effet, il est nécessaire d'éviter qu'une partie de l'éprouvette soit prélevée en peau d'un rail neuf, celle-ci subissant une forte réduction de tailles de grains (due à un temps de refroidissement très court). Ainsi, sur les premiers 100 μm sous la surface, la taille des grains est de l'ordre de 5 μm contre 30 à 50 μm dans le cœur du rail (**Figure V.2-2**). La couleur sur la **Figure V.2-2(a)**, obtenue au MEB en mode d'imagerie en diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD), représente l'orientation de chaque grain par rapport à la normale. Une estimation précise de leur taille est ainsi rendue possible.



**Figure V.2-2 : (a) Carte de désorientations des grains d'un rail neuf par EBSD
(b) Vue au microscope optique d'un rail neuf**

Pour être représentative des conditions de contact roue/rail, la géométrie des galets est calculée pour respecter une pression maximale de Hertz donnée (de l'ordre de 1 GPa) et un glissement compris entre 0,5% et 1,5% (soit $R_1 = 35,1\text{mm}$ et $R_2 = 34,9\text{mm}$ pour un glissement de 0,5%). De plus, un des deux galets possède un léger bombé caractérisé par un rayon de 200 mm pour obtenir un contact elliptique à l'élanement similaire à celui obtenu dans le cas du contact roue rail. C'est sur ce galet que sont réalisées les observations métallurgiques. Le détail des calculs est disponible dans [ZIT 12]

- Dispositifs de mesures :

Deux capteurs de proximité pointant la surface des galets permettent la détection d'écaillages à la surface de chacun des galets et arrêtent automatiquement l'essai dans ce cas. De même un accéléromètre est placé sur le bras supérieur de la machine de sorte à détecter d'éventuelles perturbations sur la piste. En l'absence d'irrégularités de surface, l'essai s'achève lorsque le nombre de cycles souhaités est atteint.

Enfin, plusieurs thermocouples sont placés dans le carter de la machine pour effectuer un contrôle de la température le plus proche possible du contact (**Figure V.2-3**). Naturellement, cette mesure globale n'est pas représentative de la distribution de température au sein du contact. Cependant, elle fournit un indicateur fiable sur l'élévation moyenne de température au cours de l'essai par rapport à l'air ambiant de la pièce.

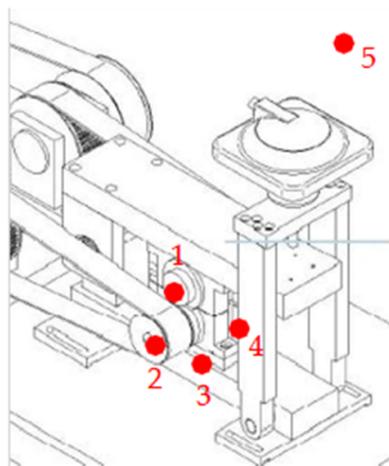


Figure V.2-3 : Localisation des thermocouples

V.2.1.2 Essai préliminaire

Pour l'essai préliminaire, il a été décidé de profiter des capacités de cyclage rapide de la machine. Initialement, l'essai devait simuler une année d'exploitation sur le RER en effectuant 720000 cycles avec un taux de glissement de 1,5%. Suite à un comportement vibratoire important de la machine, l'essai est arrêté prématurément. À l'ouverture des boîtiers, les bandes de roulement des disques sont particulièrement usées et des amas de particules d'usure éjectés du contact couvrent les carters (**Figure V.2-4**).

Malgré cette usure omniprésente, les observations microscopiques (**Figure V.2-5**) révèlent une structure extrêmement fibrée. En surface, les fibres disparaissent de manière ponctuelle pour laisser place à une structure plus homogène qui apparaît blanche au microscope, traduisant ainsi une réactivité moindre à l'attaque chimique par une solution au Nital. Quelques îlots de phases blanches ont ainsi été formés par cisaillement au cours de l'essai. Cependant, cette phase blanche n'est pas homogène et réagit plus ou moins à l'attaque chimique. Les parties brunâtres soulignent la présence de ferrite résiduelle au sein de la phase blanche, la transformation n'est donc pas totale.

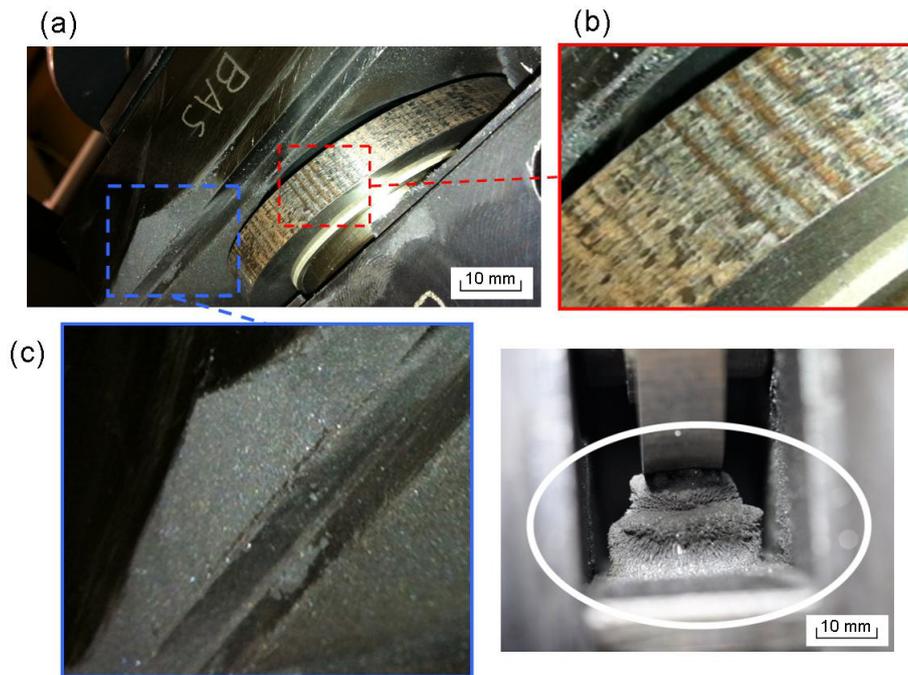


Figure V.2-4 : Usure prématurée des disques lors de l'essai préliminaire, (a) Vue générale, (b) Surface d'un galet d'essai, (c) Particules éjectées du contact

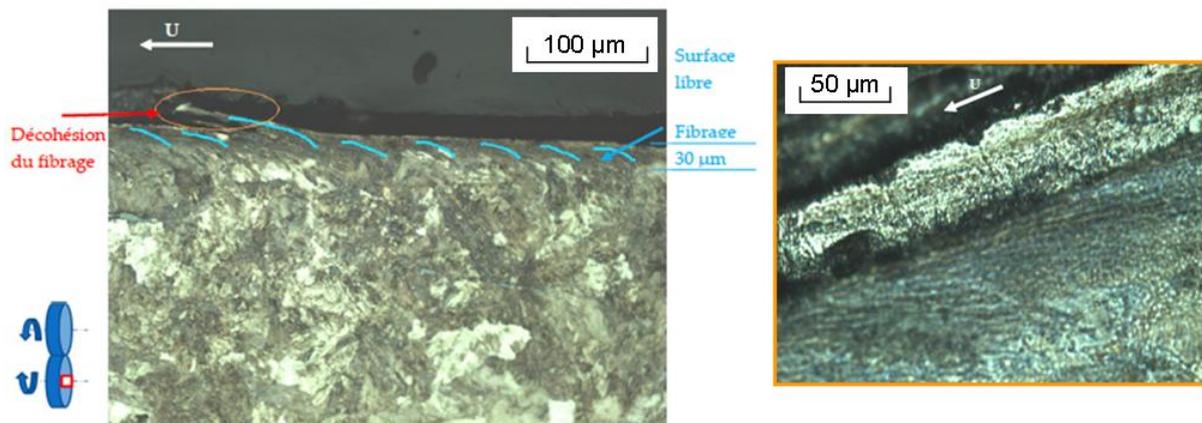


Figure V.2-5 : Observation au microscope optique de la coupe longitudinale [ZIT 12]

La surface de l'éprouvette est ainsi le siège d'une compétition usure/fatigue, les particules partiellement fibrées jusqu'à formation de phase blanche se détachent simultanément et sont éjectées hors du contact.

La prééminence de l'usure dans ce cas d'essai peut s'expliquer par plusieurs différences importantes entre le fonctionnement de la machine bi-disques et le contact roue/rail réel. Premièrement, les particules arrachées lors du contact sont éjectées par gravité ou sous l'effet de la force centrifuge. Elles ne sont pas réintroduites dans le contact et ne participent pas à l'accommodation de vitesse entre les surfaces (voir Partie VI.1.2).

Deuxièmement, les deux disques-éprouvettes ont un développé très proche (du fait de leur diamètre similaire) et s'usent donc symétriquement en subissant une succession de contacts très répétables. En circulation ferroviaire classique, le rail sera soumis à une plus grande diversité de contact sur une zone plus étendue. Pour un nombre de cycles donné, la forte répétabilité de la localisation de contacts sur la machine bi-disques est pénalisante et entraîne un épuisement de la ductilité du matériau plus rapidement.

V.2.1.3 Plan d'essais

Afin de pouvoir observer une transformation totale de la matière en phase blanche sur des épaisseurs de plusieurs micromètres, plusieurs mesures ont été adoptées de manière qualitative pour limiter l'influence de l'usure.

Comme évoquée dans la partie précédente, l'usure est un ensemble complexe de phénomènes rendus difficiles à interpréter par des occurrences simultanées [CAR 01]. Dans le cadre de cet essai, deux de ces phénomènes ont été pris en compte :

- L'usure par abrasion qui a lieu entre deux corps lorsque les aspérités de surface du corps le plus dure râpent la surface du corps mou opposé. L'abrasion combine déformation et coupe. Elle creuse d'abord des sillons puis, si les capacités de déformation sont dépassées, elle enlève des microcopeaux.
- L'usure par adhésion qui est une soudure à froid en phase solide entre deux corps soumis à une pression de contact normale. Elle suppose une forte compatibilité cristalline entre les deux surfaces. Si l'interface créée est plus résistante qu'une des pièces, il y a propagation de fissures dans corps le moins résistant et détachement de particules.

Pour réduire l'influence de l'usure par abrasion, la distance totale parcourue par les disques a été réduite en diminuant le nombre de cycles et les taux de glissement appliqués. On passe ainsi à 25000 cycles et à des taux de glissement compris entre 0 et 0,5%. Pour diminuer l'adhésion des surfaces, deux stratégies sont adoptées pour les essais 3,4 et 6. D'un côté, les surfaces en contact sont oxydées (à l'air libre ou dans une solution saline) lors des essais 3 et 4 afin de réduire la réactivité de surface. Pour l'essai n°6, la surface est rodée par écrouissage par l'intermédiaire d'une phase préliminaire en roulement sans glissement.

Les conditions d'essais sont résumées dans le **Tableau V.2-1**

N°	Particularité	Première phase			Deuxième phase		
		Pmax (GPa)	γ (%)	Nombre de cycles	Pmax (GPa)	γ (%)	Nombre de cycles
1	Aucune	1	0	25000	Aucun		
2	Aucune	1	0.5	25000	Aucun		
3	Galet laissé 24h à l'air libre avant essai	1	0.5	25000	Aucun		
4	Galet baigné dans une solution d'eau salée	1	0.5	25000	Aucun		
5	Phase de rodage lubrifiée préliminaire seule	1,5	0	25000	Aucun		
6	Phase de rodage lubrifiée préliminaire + Essai	1,5	0	25000	1	0.5	25000

Tableau V.2-1 : Conditions expérimentales des essais sur machine bi-disques

V.2.1.4 Résultats

- Essais 1 et 2 :

L'observation des coupes longitudinales de l'essai n°1 en roulement sans glissement (**Figure V.2-6(a)**) montre une microstructure peu déformée, subissant uniquement un léger écrouissage, marqué par une faible réduction de la taille des grains. Comme attendu, puisqu'il n'y a pas d'effort de cisaillement appliqué, l'attaque au Nital est homogène : il n'y a pas de formation de phase blanche.

Un essai identique avec 0,5% glissement montre la formation d'îlots de phases blanches de manière très ponctuelle (aussi bien transversalement que longitudinalement) et situés à l'extrémité de grains de perlite très déformés (**Figure V.2-6(b)**).

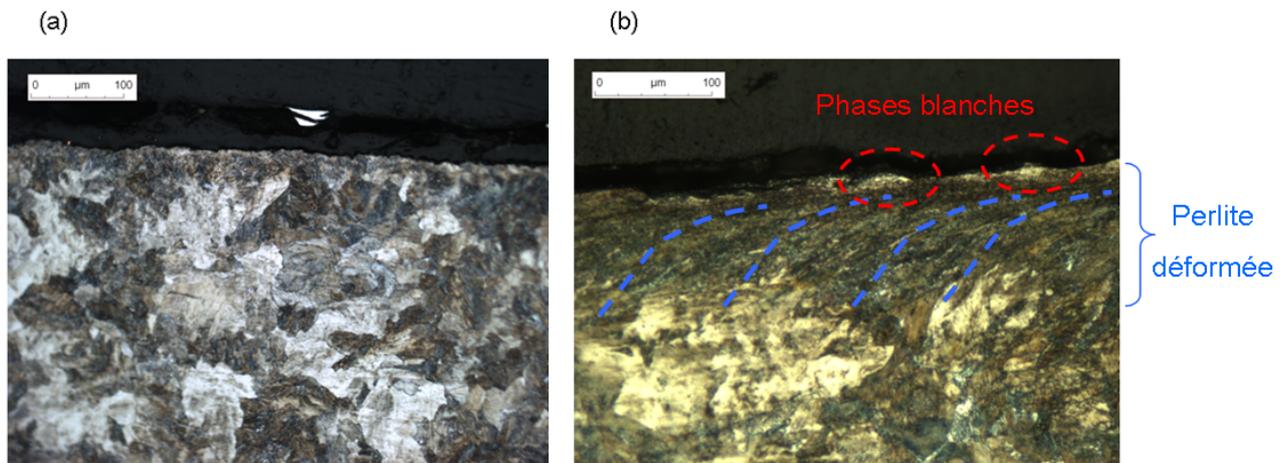


Figure V.2-6 : Observations au microscope optique (a) Essai 1 sans glissement, (b) Essai 2 avec glissement

La formation de phase blanche est cependant très parcellaire et sous forme d'îlots à la surface du galet. Suivant la position radiale et la coupe longitudinale observée, au vu d'une réaction plus ou moins forte à la solution Nital, il apparaît que le niveau de transformation du matériau est très variable. Une nouvelle fois l'usure semble dominée dans le contact au vu des aspérités importantes et des arrachements de surface observables.

Cependant, aucune élévation de température n'étant relevée au cours de ces deux essais, leur comparaison justifie en partie la possibilité de former de la phase blanche à partir de sollicitations mécaniques et en particulier un fort cisaillement.

- Essais 3 et 4 :

Afin de diminuer la réactivité de surface et donc de ralentir le phénomène d'usure par adhésion, la surface de ces galets a été légèrement oxydée, soit par réactivité avec l'air ambiant ou lors d'un bain dans une solution d'eau salée.

Les coupes longitudinales des galets 3 (**Figure V.2-7**) et 4 (**Figure V.2-8**) montrent la formation en surface de bandes de phases blanches. Ces bandes d'une épaisseur de quelques micromètres, ne sont pas visibles sur toutes les coupes longitudinales effectuées. On peut donc en déduire que leur largeur est assez faible. Cependant, contrairement aux îlots de phases blanches formés dans les essais 1 et 2, la longueur de ces bandes est relativement importante avec plusieurs centaines de micromètres. La formation de phase blanche, selon le schéma de Baumann (**Figure III.1-2**), semble donc à un stade plus avancée que des les essais précédents.

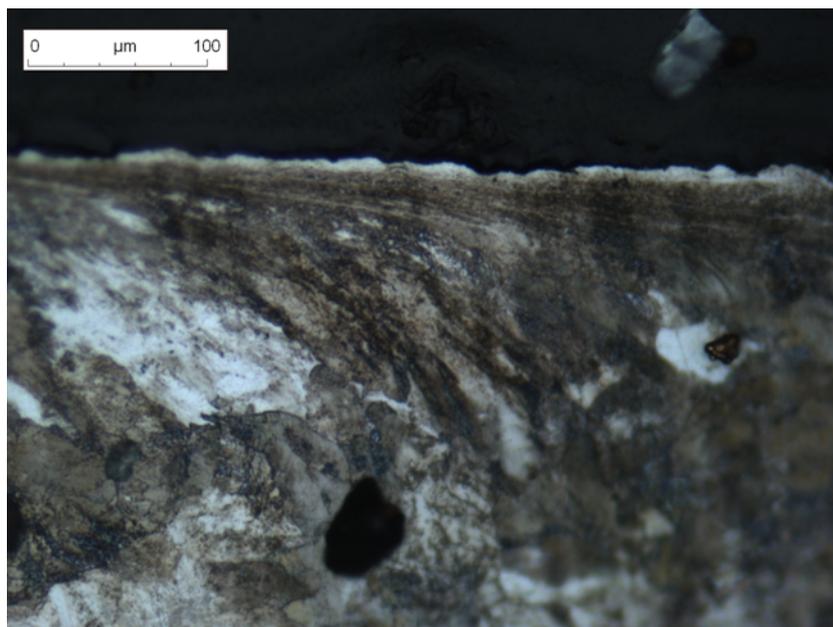


Figure V.2-7 : Coupe longitudinale du galet de l'essai 3

Dans le cas de l'oxydation par trempe dans une solution saline, la surface du galet présente des piqûres plus ou moins étendues d'oxydes. La « protection » créée n'est ainsi pas homogène, ce qui peut expliquer les variations d'épaisseur de la phase blanche suivant la position radiale sur le disque.

Cependant, outre l'aspect chimique à travers la réactivité de surface, on peut supposer que la couche d'oxyde joue également un rôle mécanique en modifiant le coefficient de frottement (d'après [CAR 13]) et en jouant le rôle de couche de « fusible tribologique », créant une progressivité dans l'augmentation des conditions de contact pour le substrat. Pour maîtriser la réactivité de surface, des essais similaires dans une enceinte à environnement contrôlé sont nécessaires pour comprendre les mécanismes exacts mis en jeu.

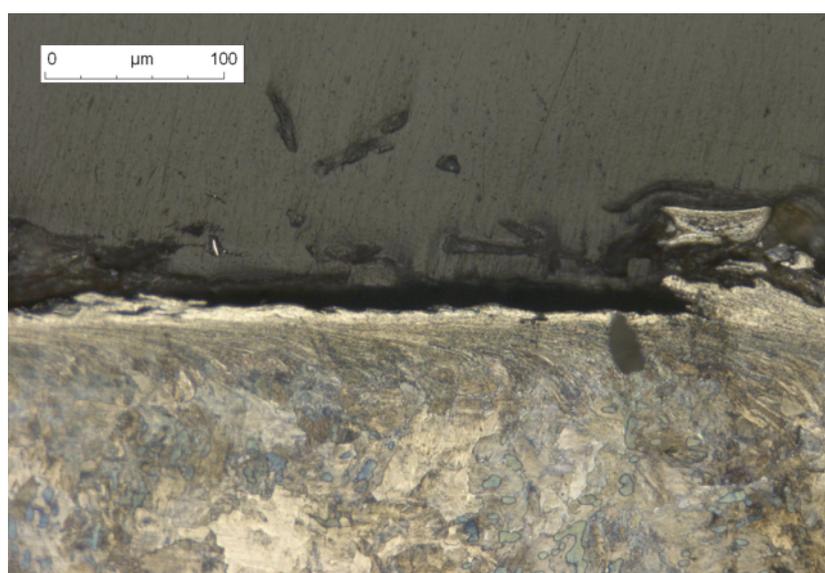


Figure V.2-8 : Coupe longitudinale du galet de l'essai 4

- Essais 5 et 6 :

Pour vérifier le rôle mécanique joué par une « couche fusible » accommodant les conditions de contact au profit du volume, celle-ci est produite de manière plus homogène en effectuant une phase de rodage initiale. Cette phase de rodage s'effectue en roulement sans glissement, sous lubrification et à une pression maximale de Hertz de 1,5 GPa. Le résultat est un galet dont la taille de grains est réduite dans sa couche superficielle.

Après essais, la surface du galet présente des bandes continues de phases blanches en nombre important et possédant une épaisseur maximale de 25 μm . Cette épaisseur, proche de celle observée sur site, est cependant encore très variable (**Figure V.2-9**) et marquée par des détachements importants de particules, qui ne semblent pas correspondre au stade final proposé par Baumann.



Figure V.2-9 : Coupe longitudinale du galet de l'essai 6

- Bilan des essais sur machine bi-disques :

En limitant au fur et à mesure l'usure, les essais permettent de produire de manière uniquement mécanique des couches de plus en plus continues de phase blanche. Les résultats obtenus sont cohérents par rapport au mécanisme de formation des phases blanches proposé par Baumann [BAU 96] (**III.1.2.1**). Selon lui, la phase blanche apparaît par îlots sur des sites préférentiels avant de fusionner et de coalescer en zones de plus en plus étendues. Les géométries des phases blanches produites au cours de ces essais, les placent plutôt en début du cycle de formation (**Figure V.2-10**).

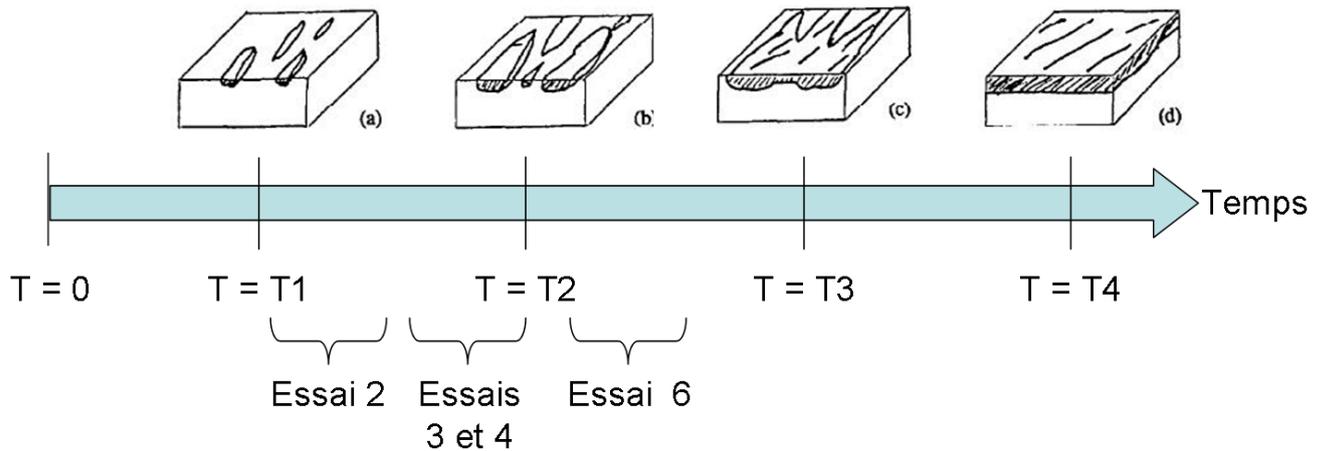


Figure V.2-10 : Position des essais dans le mécanisme de formation de la phase blanche proposée par Baumann

Une nuance doit être apportée au mécanisme proposé par Baumann : le rôle de l'usure. Une fois formée, comment évolue une couche uniforme de phase blanche ?

Deux possibilités semblent envisageables :

- La phase blanche se stabilise à une certaine épaisseur, image de l'équilibre entre l'usure et la formation d'une couche plus jeune.
- La phase blanche est arrachée et reprend le cycle depuis une apparition par îlots.

Pour obtenir un début de réponse, des essais similaires à ceux produisant de la phase blanche pourraient être effectués sur un nombre de cycles plus grand pour vérifier l'étalement ou non de la couche de phase blanche produite. L'usure inhérente à la machine bi-disques rend cette étude compliquée sur ce type de banc et d'autres solutions seront proposées au **Chapitre VI (VI.3.1)**.

L'influence de la pression de rodage sur l'épaisseur de phase blanche formée par l'intermédiaire d'une couche de « fusible tribologique » plus ou moins épaisse mériterait également quelques essais supplémentaires pour être prouvée.

L'équilibre complexe entre usure et fatigue empêche d'avoir une vision très claire sur les phénomènes et conditions mécaniques réellement appliquées au sein du contact. Ainsi, les conditions de formation de la phase blanche ont également été étudiées sur un autre banc d'essai, mais à une échelle plus locale encore (de l'ordre du μm) et dans des conditions quasi-statiques sans débit d'usure possible.

V.2.2 Essais RHEOS

Les essais commentés dans cette partie ont été réalisés par Anouar Halloumi au LaMCoS. Des détails supplémentaires sur le protocole expérimental et les résultats obtenus pourront être trouvés dans [HAL 12].

V.2.2.1 Détails du dispositif expérimental

- Description de la machine RHEOS :

RHEOS est une machine d'essai composée de deux enclumes qui mettent en compression et torsion un corps d'épreuve. L'enclume supérieure est fixe tandis que l'enclume inférieure peut se déplacer verticalement et mis en rotation autour de ce même axe (**Figure V.2-11**).

La force normale applicable est comprise entre 0 et 75 T, l'angle de rotation est piloté par un moteur. Les vitesses de montées et de descente en charge, ainsi que les vitesses de torsion sont également contrôlées.

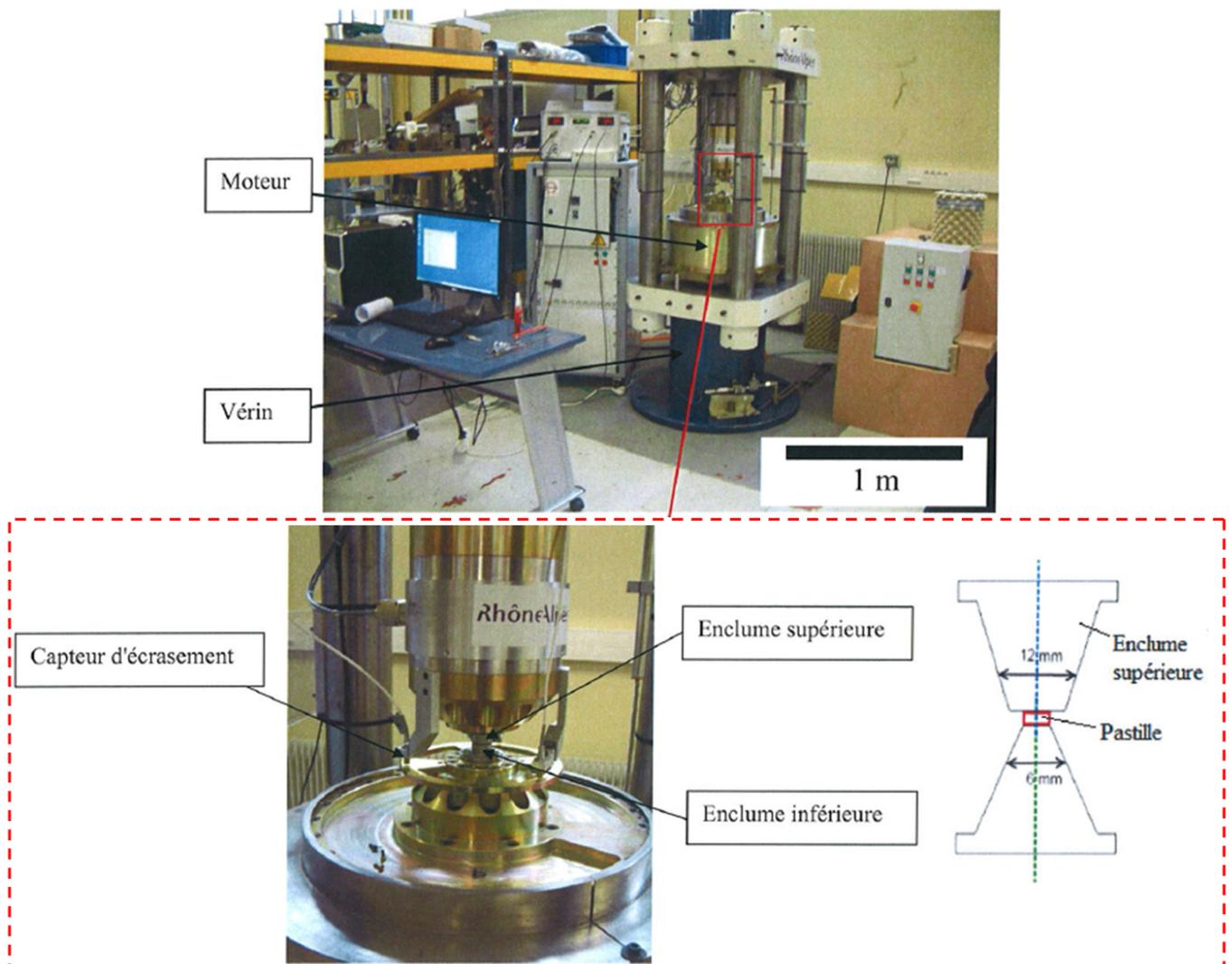


Figure V.2-11 : Dispositif d'essais RHEOS

- Caractéristiques des éprouvettes :

De nouveau, le matériau utilisé est l'acier à rail R260 classique. Des cylindres de 6mm de diamètre sont découpés selon l'axe vertical du profil de rail par électroérosion. Des pastilles d'une épaisseur de $h=500\mu\text{m}$ sont ensuite découpées à la scie à fil et polies manuellement sur les deux faces planes.

La première pastille (**Figure V.2-12**) n'est pas utilisée pour s'affranchir d'éventuels problèmes d'hétérogénéité dus au matériau en peau du matériau ou au refroidissement lors de la fabrication.

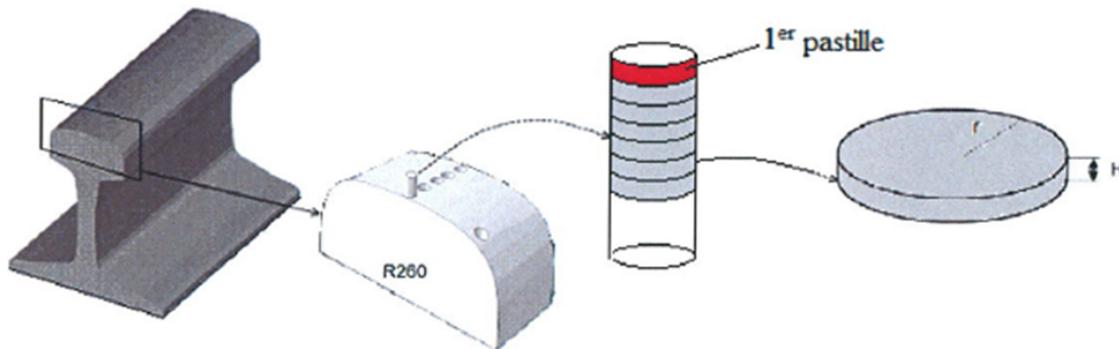


Figure V.2-12 : Schéma de prélèvement des éprouvettes

- Conditions d'essais :

Le tableau suivant donne le plan d'expérience effectué lors de cette campagne d'essais (**Figure V.2-13**). Il prévoit notamment de tester l'influence de différents paramètres tels que la pression, l'angle de cisaillement et la vitesse de rotation sur la formation de phase blanche.

N° essai	ϕ pastille (mm)	Enclumes ϕ_1 (mm) ϕ_2 (mm)	Pression (GPa)	Angle (°)	H_i (μm)	H_f (μm)	Vitesse de l'essai (tr/min)
1	6	12/6	2	60	500	343	0.5
2	6	12/6	2	120	500	290	0.5
3	6	12/6	2	180	500	260	0.5
4	6	12/6	1	180	460	370	0.5
5	6	12/6	2.5	180	530	250	0.5
6	6	12/6	2	180	550	270	0.033

Figure V.2-13 : Plan expérimental initial

- Remarque :

Des problèmes de glissement à l'interface entre enclumes et pastilles compliquent l'interprétation de ces résultats d'essais. En effet, les pressions appliquées sont faibles par rapport à la gamme d'effort applicable par le vérin. En conséquence seule la partie centrale de la pastille adhère et voit la totalité du couple appliqué. La **Figure V.2-14(b)** montre la surface d'une pastille après essai. On y distingue la zone d'adhérence où les stries de polissage sont encore visibles entourées d'une zone de glissement. Ainsi l'angle de cisaillement appliqué par RHEOS n'est transmis au sein du volume que dans et par la partie adhérente de la pastille (**Figure V.2-14 (c)**).

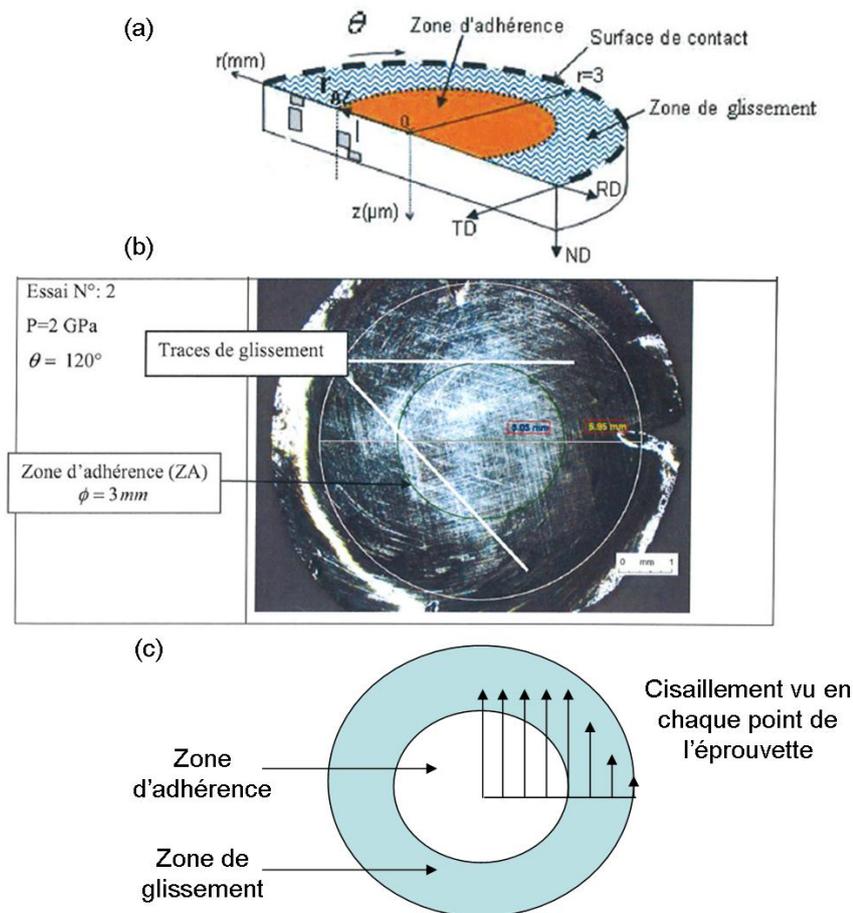
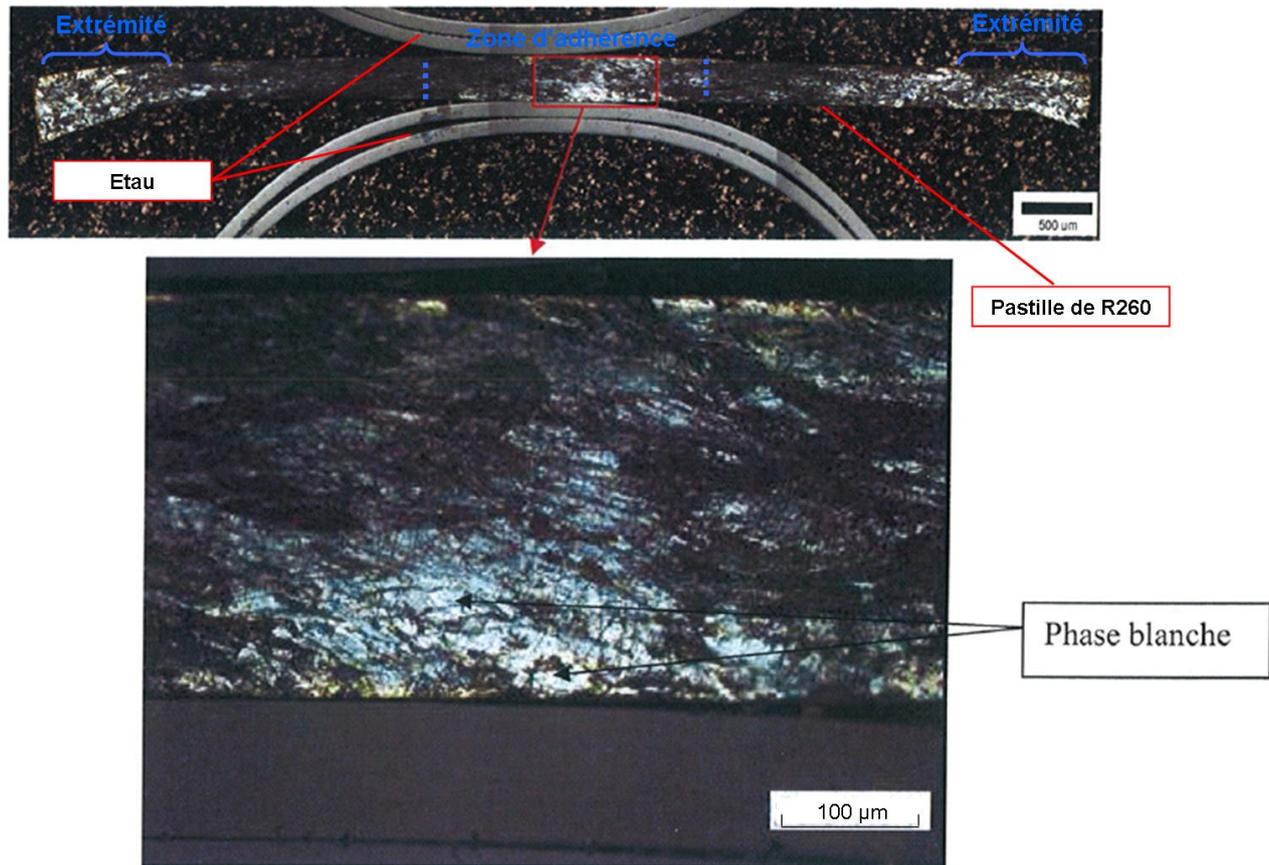


Figure V.2-14 : Définition de la zone d'adhérence sur les éprouvettes testées

En particulier, ces problèmes de glissement à l'interface entre enclumes et pastilles viennent modifier de manière inopportune les couples appliqués lors des modifications sur la pression normale et la vitesse de rotation. Il est alors difficile de discerner l'influence du paramètre variable de l'essai par rapport à la variation de couple parasite. Seuls les résultats concernant l'influence de l'angle de cisaillement seront donc décrits dans cette partie.

V.2.2.2 Résultats

Les **Figure V.2-15** et **Figure V.2-16** présentent une vue en coupe des pastilles de R260 après essai, respectivement pour un angle de 120° et de 180° . Dans les deux cas, on observe trois zones de transformations principales de la matière : la zone adhérente de la pastille où le couple appliqué est maximal et les deux extrémités de la pastille qui correspondent aux écoulements plastiques ayant lieu durant la mise en charge. Ces zones de transformation correspondent aux zones de déformation plastique maximale [BUS 09].



Concernant la partie adhérente, de manière qualitative, on note une plus grande étendue de matière transformée dans l'essai à 180° . Plus l'angle de cisaillement augmente, plus la transformation en phase blanche semble importante. Il est ainsi possible de transformer un grain de perlite en phase blanche soumis à un angle de cisaillement de 180° sans élévation de température. Cependant la transformation n'est pas homogène au sein du volume : Les grains sont plus ou moins transformés.

De manière similaire, la transformation n'est pas totale non plus en périphérie de la pastille et la phase blanche n'y apparaît pas continue.

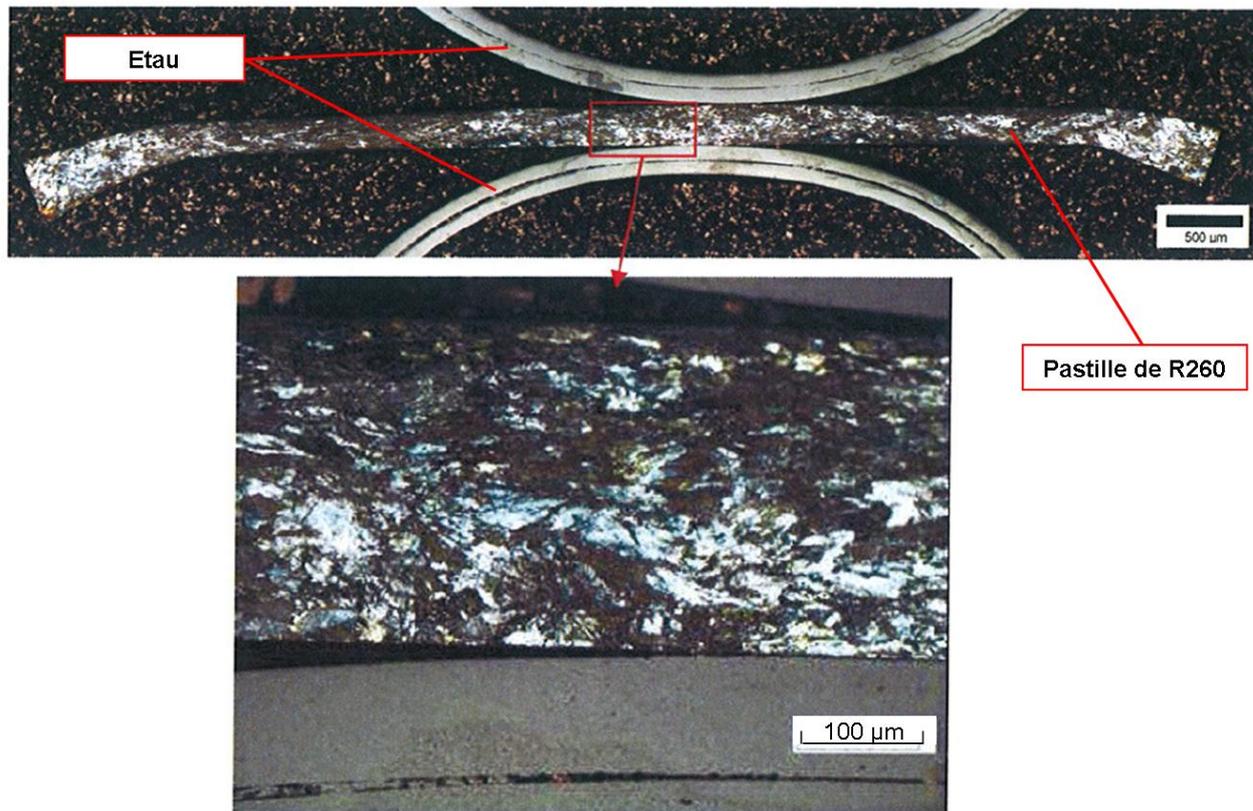


Figure V.2-16 : Vue de coupe après essai à 2 GPa et 180 °

Plusieurs hypothèses complémentaires peuvent être émises pour expliquer ces différents niveaux de transformations :

- L'orientation initiale des lamelles de cémentite par rapport à la direction de cisaillement les prédispose à une dissolution plus ou moins rapide (**Figure V.2-17a**). Le cas le plus critique pourrait être une orientation soit perpendiculaire soit parallèle au cisaillement. Dans le premier cas, le cisaillement aurait tendance à briser les lamelles, et dans le second à réduire la distance inter lamellaire.
- L'inhomogénéité de transformation pourrait également être liée à la disposition du grain (c'est-à-dire la disposition de la matrice ferritique) par rapport au cisaillement (**Figure V.2-17b**). La dimension caractéristique du grain dans la direction perpendiculaire au cisaillement favorisera ou défavorisera l'élongation plastique et donc la naissance de dislocations susceptibles de drainer les atomes de carbone.
- Il est nécessaire d'évaluer les taux de carbone contenu dans la phase blanche car il pourrait s'avérer beaucoup plus important que le taux de 0,77% de carbone de la perlite lamellaire classique R260. Dans ce cas, la disparité de transformation pourrait être liée à une pénurie d'atomes de carbone. A volume équivalent, faute d'atomes à diffuser, il n'y aurait pas de transformation. Ce problème ne se poserait pas sur un rail « réel », le substrat pouvant fournir les atomes nécessaires. Par exemple dans [KRA 99], certaines formes de martensite possèdent jusqu'à un taux de 1,4% de carbone.

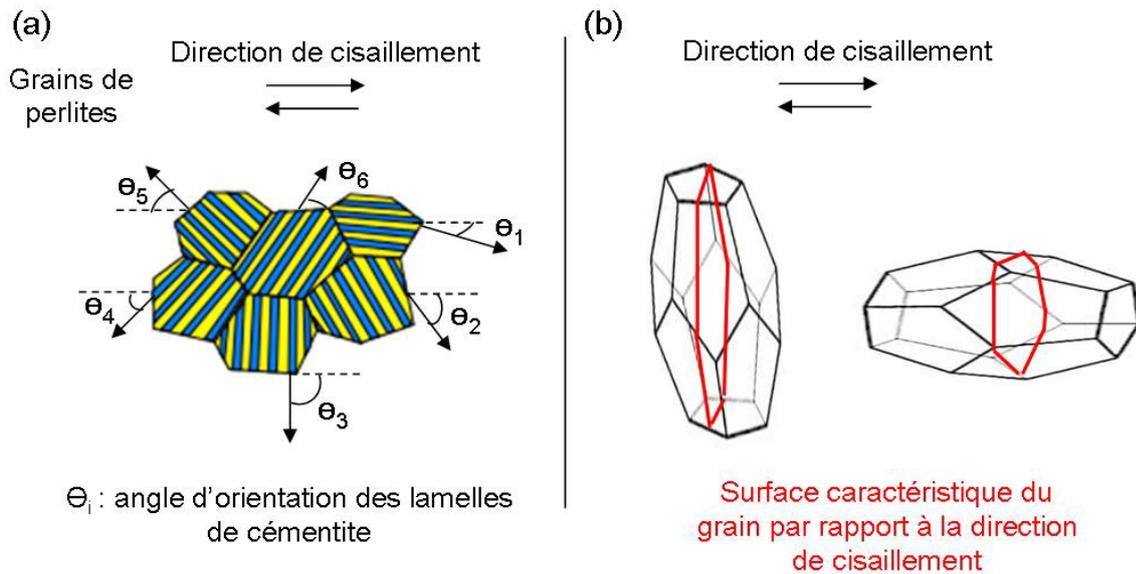


Figure V.2-17 : Positionnement de la microstructure par rapport à la direction de cisaillement : (a) Orientation des lamelles, (b) Orientation de la matrice ferritique

Il est également intéressant de noter sur la **Figure V.2-16**, que la transformation semble plus complète aux extrémités de la pastille que dans la zone d'adhérence. La direction de cisaillement et de déformation est unique. Au contraire, les plans de dislocations vont avoir des directions variées dans la partie extrudée hors des enclumes. Cette variété de directions de dislocations pourrait permettre un brassage plus important et plus grande diffusivité des atomes de carbone.

Des essais complémentaires sont nécessaires pour valider ces hypothèses. Cependant, cet essai de compression/cisaillement montre la possibilité de créer de la phase blanche mécaniquement sans élévation de température et de manière quasi-statique sur un unique cycle de déformation.

V.3 Conclusion

Les différents essais présentés au cours de ce chapitre valident la possibilité d'une formation purement mécanique du gradient de microstructures observé en 2009 et responsable de l'apparition des squats.

Cependant ces essais mettent également en évidence que l'accommodation plastique et les transformations de phases subies par le rail cohabitent simultanément avec d'autres phénomènes tels que l'usure ou un vieillissement thermique des matériaux. Jusqu'à présent, cet équilibre était supposé dominé par la fatigue de contact. Cependant, au vu du suivi sur site et des essais réalisés en laboratoire, la réponse du matériau semble être extrêmement sensible et peut basculer vers l'usure (voir essais bi-disques) ou vers une réponse thermique (voir observation terrain sur Bussy St Georges) pour de simples petites variations de conditions d'entrées.

Pour pouvoir élargir le cadre de l'étude à d'autres zones de squats, il est donc nécessaire de proposer un scénario d'amorçage du squat prenant en compte les différents phénomènes observés lors des essais et les différentes réponses tribologiques du matériau qui en découlent.

Chapitre VI : Synthèse générale et perspectives

Le suivi de la zone d'essai de Bussy-St-Georges et les essais complémentaires en laboratoire (**Chapitre V**) illustrent que la caractérisation exhaustive de la réponse tribologique de l'acier à rail nécessite la prise en compte des écoulements d'accommodation plastique, de l'usure et des transformations de phase. Le squat résulte d'équilibres entre ces trois phénomènes.

Afin de proposer un circuit complet de formation du squat, il est nécessaire d'introduire plusieurs outils de conceptualisation pour formaliser le problème du contact roue/rail.

VI.1 Une modélisation tribologique adaptée au contact roue/rail

Dès 1886, les équations de Reynolds [REY 86] proposent un formalisme mathématique dans le cas d'un contact lubrifié. Cette modélisation théorique de la dynamique des interfaces n'existe pas dans le cas d'un contact sec. Trois outils articulés autour de la notion de « Troisième corps » sont alors introduits pour permettre une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure [GOD 84, BER 95] : le triplet tribologique, le mécanisme d'accommodation de vitesse et le circuit tribologique.

VI.1.1 Triplet tribologique

Au début des années soixante-dix, Godet [GOD 84] introduit le concept de triplet tribologique (**Figure VI.1-1**) dans le cadre d'études sur le contact frottant. Cet outil permet d'étudier les phénomènes relatifs au contact en prenant en compte les trois échelles suivantes :

- L'échelle du mécanisme (le train et l'infrastructure ferroviaire) : Pour des conditions environnementales données (Température, humidité), le contact est sollicité par un mécanisme, défini par des paramètres de raideurs et d'amortissement, et qui applique un chargement et une cinématique;
- L'échelle des premiers corps (la roue et le rail) : L'étude à cette échelle concerne la réponse volumique des matériaux aux sollicitations du mécanisme;
- L'échelle du troisième corps (l'interface roue/rail) : Le troisième corps représente l'amalgame des éléments se trouvant à l'interface entre les premiers corps. Il est composé à la fois de contaminants extérieurs et de particules détachées des premiers corps. Dans le cas du contact roue-rail, une couche d'épaisseur variable est identifiée à la surface de la roue et du rail et elle est constituée de particules d'acier, d'eau, de sable, d'huile... Le troisième corps permet principalement de transmettre la charge (forces normales) et d'accommoder les vitesses (forces tangentielles) d'un premier corps à l'autre.

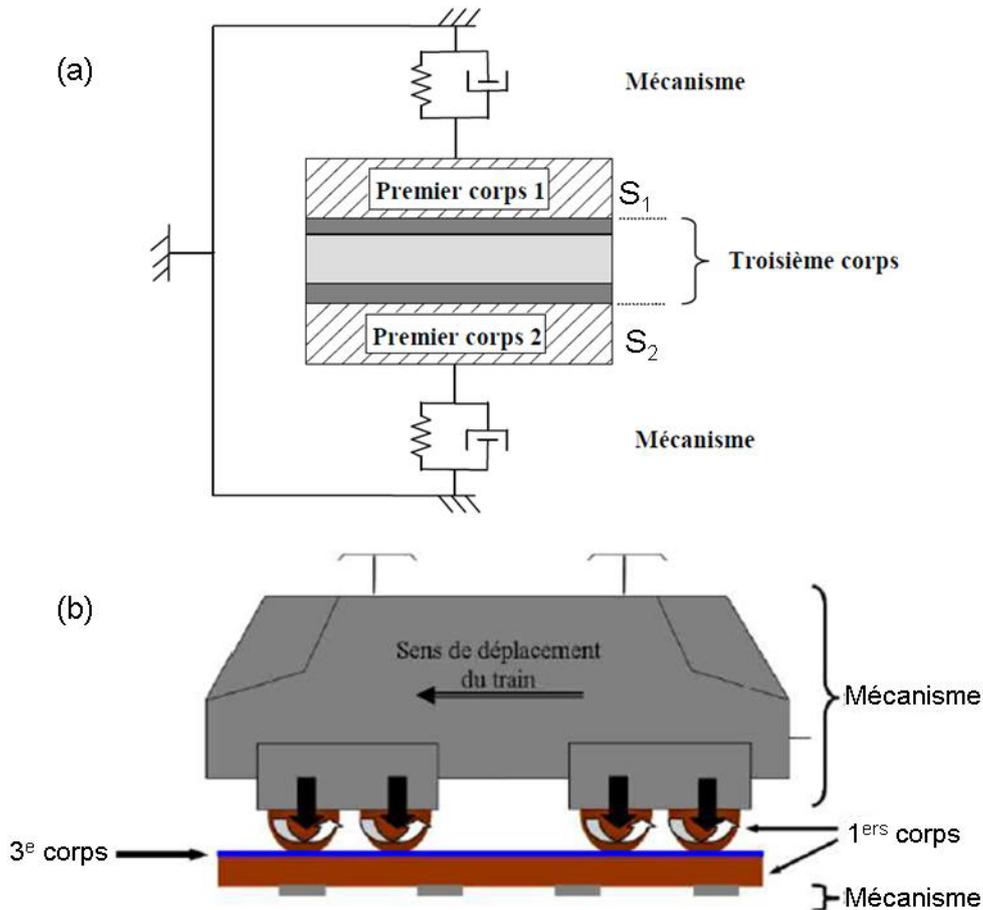


Figure VI.1-1 : Triplet tribologique : (a) Forme théorique [LIN 05],
 (b) Application au contact roue-rail ferroviaire [SAU 05]

VI.1.2 Accommodation de vitesse

L'identification du triplet tribologique effectuée, la modélisation tribologique d'un contact frottant se poursuit par la caractérisation des mécanismes d'accommodation de vitesses activés dans le contact [BER 95]. Il s'agit d'identifier les sites, notés S_i , et les modes, notés M_j , de l'accommodation de vitesse (Figure VI.1-2).

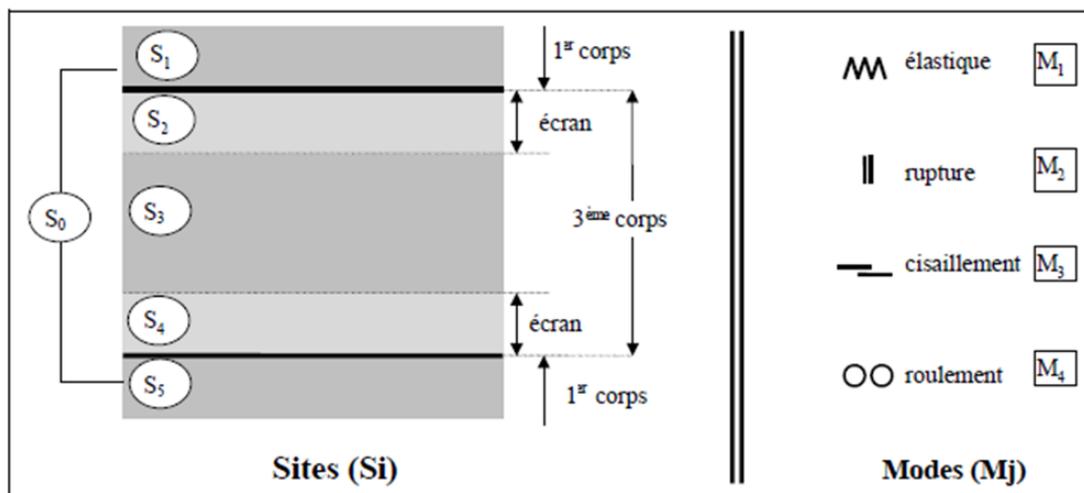


Figure VI.1-2 : Mécanismes d'accommodation de vitesse au sein d'un contact [BER 88, NIC 01]

Les lieux d'accommodation possibles sont : le mécanisme (S_0), les premiers corps (S_1 et S_5), le troisième corps divisé en sa partie centrale (S_3) et des couches écrans (S_2 et S_4). Chaque site peut potentiellement accommoder la vitesse selon quatre modes différents :

- M_1 : la déformation élastique
- M_2 : la rupture normale
- M_3 : le cisaillement (qui correspond aux écoulements plastiques observés précédemment)
- M_4 : le roulement

VI.1.3 Circuit tribologique

Les évolutions en fonction du temps du triplet tribologique, du lieu et des modes d'accommodation de vitesse constituent la vie du contact [BER 88]. Celle-ci est représentée par le circuit tribologique qui permet de traduire les écoulements du troisième corps dans le contact sous la forme de débits différents (**Figure VI.1-3**):

- Un débit source Q_s composé du détachement de particules Q_{si} , internes au contact (issues des premiers corps), ainsi que de l'introduction Q_{se} de particules extérieures du contact.
- Un débit interne Q_i correspondant aux particules de troisièmes corps piégés entre les deux surfaces.
- Un débit d'éjection Q_e correspondant aux particules qui sortent du contact et divisé en un débit de recirculation Q_r dans le contact et un débit d'usure Q_w perdu définitivement par le contact.

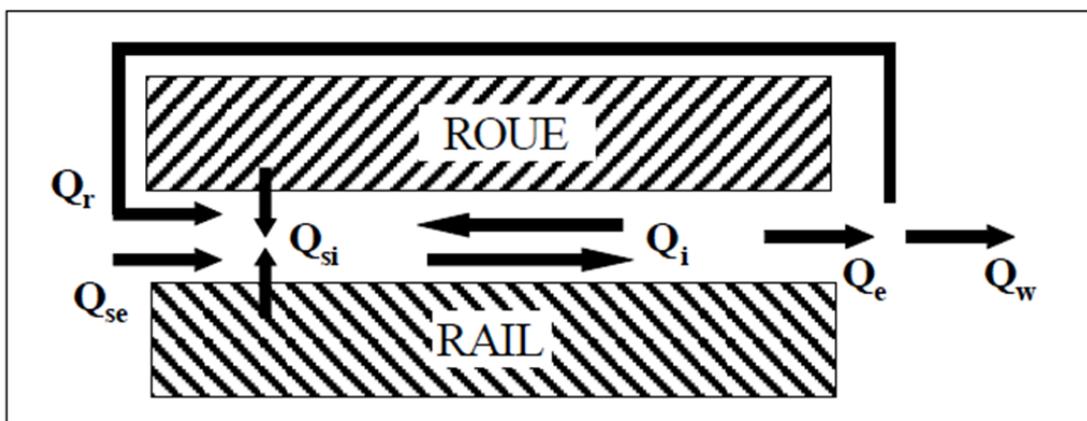


Figure VI.1-3 : Circuit tribologique [BER 88, NIC 01]

Dans le cas du contact roue-rail, ce circuit tribologique théorique nécessite d'être étendu selon une troisième direction [JAC 96]. Les débits précédents sont alors étudiés selon deux composantes, une longitudinale et une latérale qui s'écrira sous la forme :

$$Q_x = Q_{x\text{Longi}} + Q_{x\text{Lat}} \quad \text{avec } x = s, i, e$$

VI.2 Mise en œuvre de la modélisation tribologique

VI.2.1 Application au cas général

Dans le cadre de cette modélisation tribologique du contact roue rail, les paramètres utilisés au cours de la présente étude pour caractériser la réponse tribologique du rail sont l'accommodation plastique aux efforts de cisaillement, notée ${}^{\text{rail}}M_3$ et le débit de perte de matière du rail correspondant à ${}^{\text{rail}}Q_{\text{si}}$. À ces deux paramètres, pour prendre en compte les transformations de phase observées à la surface du rail, on ajoute un paramètre, noté TTS, dont la valeur correspond au volume de phase blanche formé.

On choisit arbitrairement de définir ces trois paramètres à l'échelle du contact. Au préalable, l'hypothèse est faite qu'il existe une échelle suffisamment locale²¹ pour laquelle un volume représentatif des couches superficielles du rail possède un comportement unitaire : soit ce volume s'écoule plastiquement, soit il se détache, soit il subit une transformation de phase. À l'échelle du contact, l'ensemble des volumes représentatifs qui se déforment constitue alors ${}^{\text{rail}}M_3$, qui est ainsi assimilable à la plastification du rail. Il est caractérisé par l'angle formé entre la direction des joints de grains déformés et des lamelles réorientées par rapport la normale à la surface (I.3.1.2). Les volumes représentatifs qui se détachent forment ${}^{\text{rail}}Q_{\text{si}}$ qui représente le débit de détachement de matière subi par le rail, c'est-à-dire l'usure ($Q_{\text{si}} = Q_{\text{w}}$). TTS se rapporte alors aux volumes représentatifs qui changent de nature. À l'échelle du contact, ces trois débits peuvent donc coexister et ne sont pas exclusifs l'un par rapport l'autre. Un équilibre existe ces trois débits au sein du contact.

Dans le cadre de ce formalisme et pour exprimer cet équilibre, les états définissant la réponse tribologique du rail constituent un triplet (déformation plastique, usure et formation de phase blanche) qui peut se représenter dans un repère cartésien (Figure VI.2-3) : l'axe des abscisses définit l'équilibre entre les débits d'usure et de déformation plastique et l'axe des ordonnées correspond à l'épaisseur de phase blanche formée soit mécaniquement, soit thermiquement, soit mécano-thermiquement.

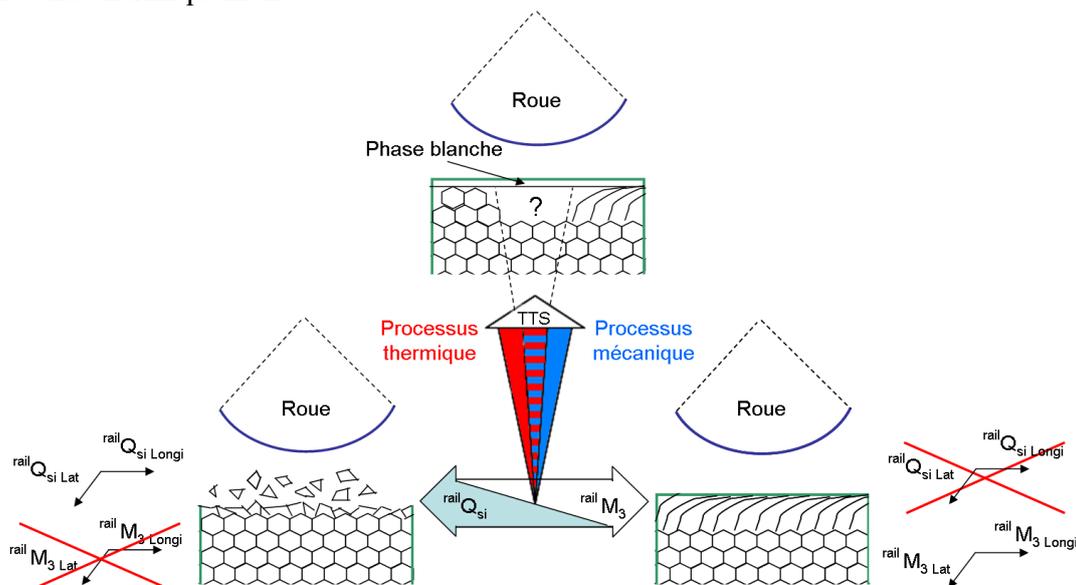


Figure VI.2-1 : Représentation de la compétition déformation/détachement/transformation

²¹ Les observations des Chapitres 2 et 5 montrent un comportement différent au sein d'un même grain. Dans le cas d'une nuance perlitique, le volume représentatif à prendre en considération a donc des dimensions caractéristiques inférieures à celle d'un grain de perlite (environ 20 μm).

Comme évoquée précédemment dans la partie **III.1.3.1**, la formation de phase blanche peut-être activée mécaniquement ou thermiquement²². Avec cette dernière possibilité, l'apparition de TTS est indépendante de la compétition entre l'usure et la déformation plastique. Autrement dit, la formation de TTS n'est pas uniquement un prolongement d'un état de déformation plastique important et constitue bien une dimension supplémentaire (et « orthogonale » car indépendante) dans la réponse tribologique du matériau.

De plus, la partie **III.1.3.2** a permis de souligner que la formation de phase blanche était issue de la diffusion des atomes de carbone. Celle-ci est rendue possible par le franchissement (ou l'abaissement) d'une barrière d'énergie potentielle de diffusion E_p suivant des phénomènes thermiques, mécaniques ou physico-chimiques. Un raisonnement similaire peut être établi pour schématiser la compétition entre l'usure et la déformation plastique : Un système interdépendant de phénomènes mécaniques, thermiques et physico-chimiques permet le dépassement ou l'abaissement d'une limite d'intégrité tribologique des couches superficielles, notée R_{lim} . Tant que cette limite n'est pas dépassée, le volume élémentaire se déforme et participe à ${}^{rail}M_3$. Au-delà de cette limite, la particule considérée se détache et contribue à ${}^{rail}Q_{si}$.

Différentes modélisations numériques de cette vision théorique de la compétition entre l'usure et l'accumulation de déformations plastiques existent. Par exemple, la « modélisation par briques » de la microstructure proposée par Franklin et Kapoor [KAP 00, FRA 01, FRA 03, FRA 07] : Les éléments (ou « briques ») accumulent les déformations plastiques jusqu'à une valeur limite considérée comme synonyme de rupture (**Figure VI.2-2**). Ringsberg [RIN 00, RIN 01] cherche également à définir l'évolution du paramètre d'endommagement subit par chacun des volumes élémentaires ainsi que la valeur limite que ce dernier peut atteindre.

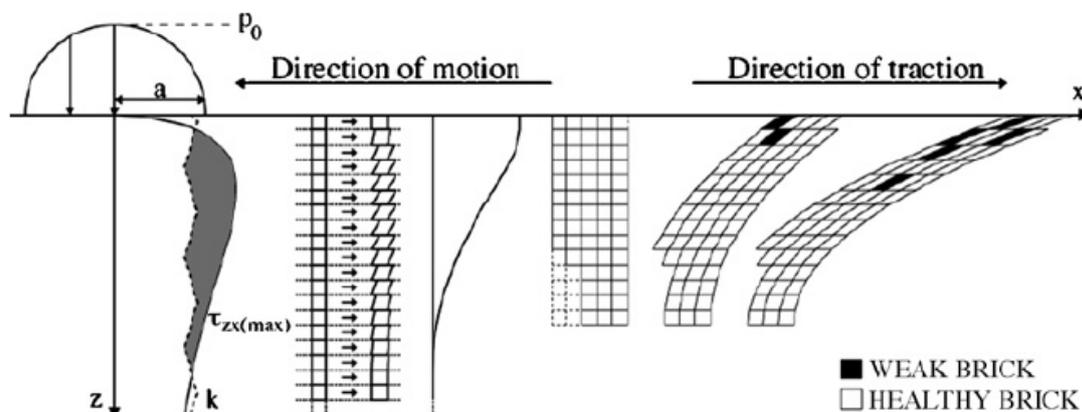


Figure VI.2-2 : « Modélisation par briques » de la microstructure [FRA 08]

Ces différents modèles ne permettent cependant pas de prendre en compte les transformations de phases dans la réponse du matériau. Ces dernières apparaissent cependant modélisables à travers des simulations 2D thermo-mécaniques par éléments finis [ANT 13]. À l'avenir un « outil complet » de simulation de la réponse tribologique d'un acier prenant en compte le détachement, la déformation et la transformation des volumes élémentaires est donc envisageable (au moins vis-à-vis du champ de contraintes mécanique). Il nécessite cependant un recalage expérimental des paramètres utilisés pour définir les lois de comportements des matériaux.

²² Une formation de phase blanche où une réaction physico-chimique jouerait un rôle moteur et non pas uniquement de « facilitateur de diffusion » n'a pas été observée dans le cadre de cette étude. Elle n'est cependant pas exclue d'un point de vue théorique.

Pour permettre cette étude expérimentale des lois de comportements, il peut être intéressant de classer l'influence des différents phénomènes qui agissent sur la réponse tribologique du rail. Une possibilité pour classer ces phénomènes (**Figure VI.2-3**) est de les trier suivant leurs natures (thermique, mécanique, physico-chimique) et leurs rôles d'actionneur (s'ils permettent directement de franchir E_p et/ou $Rlim$) ou de facilitateur (s'ils abaissent le niveau de E_p et/ou $Rlim$).

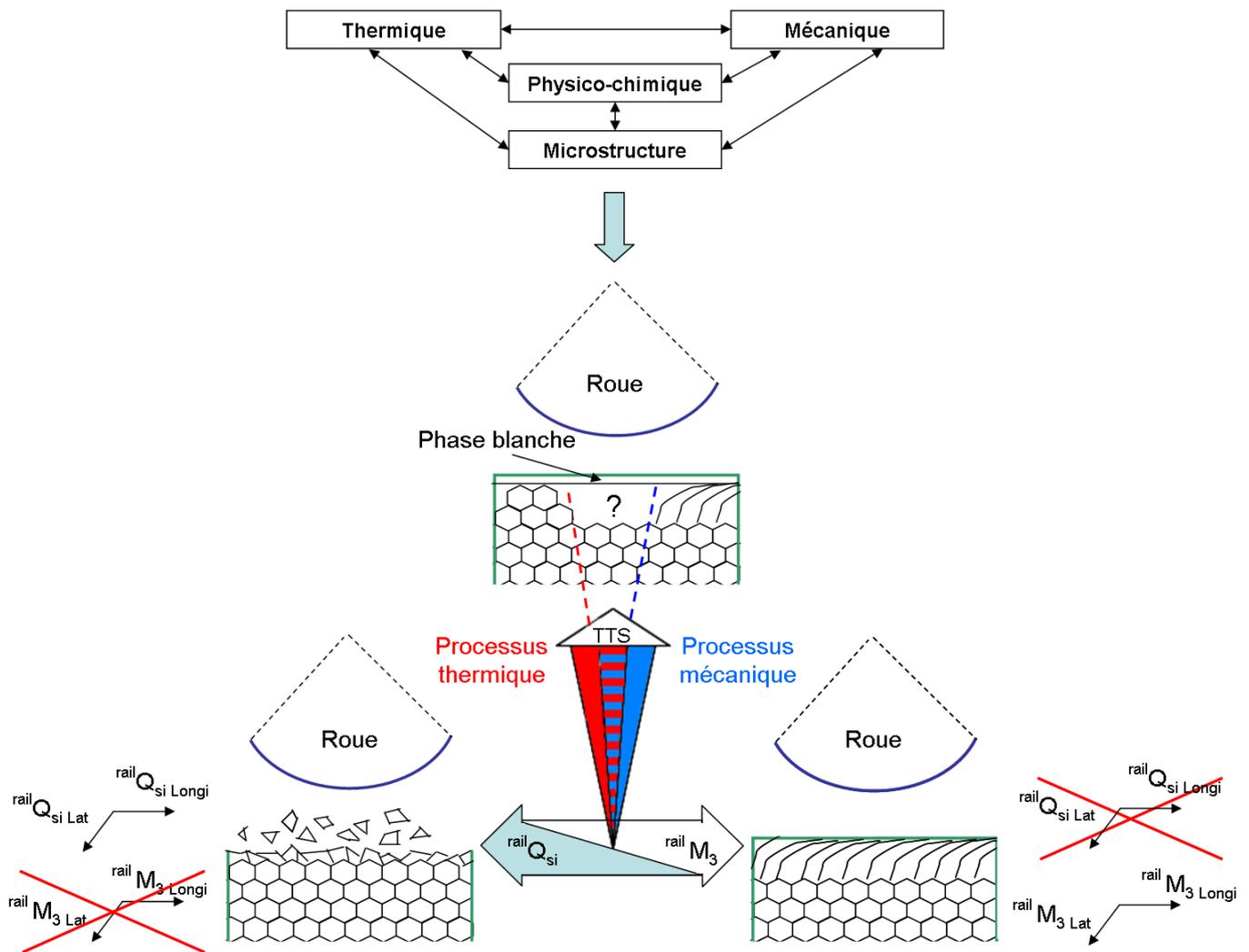


Figure VI.2-3 : Réponse tribologique de l'acier à rail

VI.2.2 Application au cas d'étude RATP

Sur la zone d'essais de Bussy-St-Georges, différentes réponses tribologiques du rail ont été observées entre 2009 et 2013. Ces différences proviennent de la réponse de la microstructure aux différentes conditions de contact subies par le rail. Le repère cartésien introduit dans la partie précédente permet d'illustrer cette variabilité de la réponse tribologique du rail (**Figure VI.2-4**).

En 2009, l'échantillon observé (**II.2.2**) présente une morphologie organisée par bandes longitudinales de microstructures. Chaque bande présente une orientation privilégiée de la matière en fonction de la direction de cisaillement ainsi qu'une épaisseur de phase blanche plus ou moins importante. Chacune de ces microstructures constitue donc une réponse tribologique du rail spécifique, pilotée par des valeurs des paramètres $^{rail}M_3$ et TTS suffisamment différentes (malgré la proximité géométrique de quelques millimètres !). La fissure du squat étudiée naît de la coexistence de ces réponses tribologiques différentes sur ces quelques millimètres. Les observations de la microstructure permettent de supposer que ces réponses tribologiques sont essentiellement influencées par le champ de contraintes mécaniques (**III.1.3.3**). Au contraire, en 2013, la microstructure sous la phase blanche laisse ainsi apparaître un faible cisaillement de la matière. $^{rail}M_3$ est ainsi supposé plus faible dans ce second cas. De plus les fissures naissantes observées s'initient au sein ou à la frontière d'îlots de phase blanche d'origine supposée thermique. Cette fissure pourrait potentiellement se propager également en squat ou dégénérer sous une autre forme. Le terme de « stud » [GRA 11, GRA 12] a, par exemple, été introduit pour qualifier un défaut visuellement semblable au squat mais qui se développe sans accumulation sévère de déformations plastiques. Le squat n'est ainsi peut-être que la version mécanique d'une famille de défaut plus large.

Ce changement radical dans la nature de la réponse tribologique de l'acier à rail peut s'expliquer par une variabilité importante des champs de contraintes appliqués au matériau, qu'ils soient mécaniques, thermiques ou physico-chimiques. L'extrême sensibilité de ces champs de contraintes à la combinaison de faibles variations d'entrée a été observée au cours des différents essais. Par exemple :

- L'essai IRR (**IV.3.4.2**) montre qu'une légère dissymétrie du bogie (raideur des suspensions, tarage des longueurs à vide...) associée à de faibles variations géométriques de la voie (inférieures aux recommandations de la norme [NOR 10b]) peut entraîner des efforts de traction deux fois supérieurs à la situation nominale.
- Le suivi des différentes nuances d'acier à rail sur la zone de Bussy-St-Georges de 2009 à 2013 (**V.1**) laisse apparaître des phases blanches d'origine thermique. Celles-ci semblent liées aux facettes induites par le meulage initial de la zone. La persistance de cette variation géométrique (de l'ordre de 10 à 20 μm) sur les nuances dures modifie suffisamment les conditions de contact (en particulier le glissement) pour générer une forte élévation de température.
- L'essai sur machine bi-disques (**V.2.1**) souligne l'influence de la réactivité de surface sur le débit d'usure $^{rail}Q_{si}$. De manière qualitative, l'oxydation du rail (par temps de pluie, ou après une interruption de trafic) modifie potentiellement à elle seule la réponse tribologique du rail.

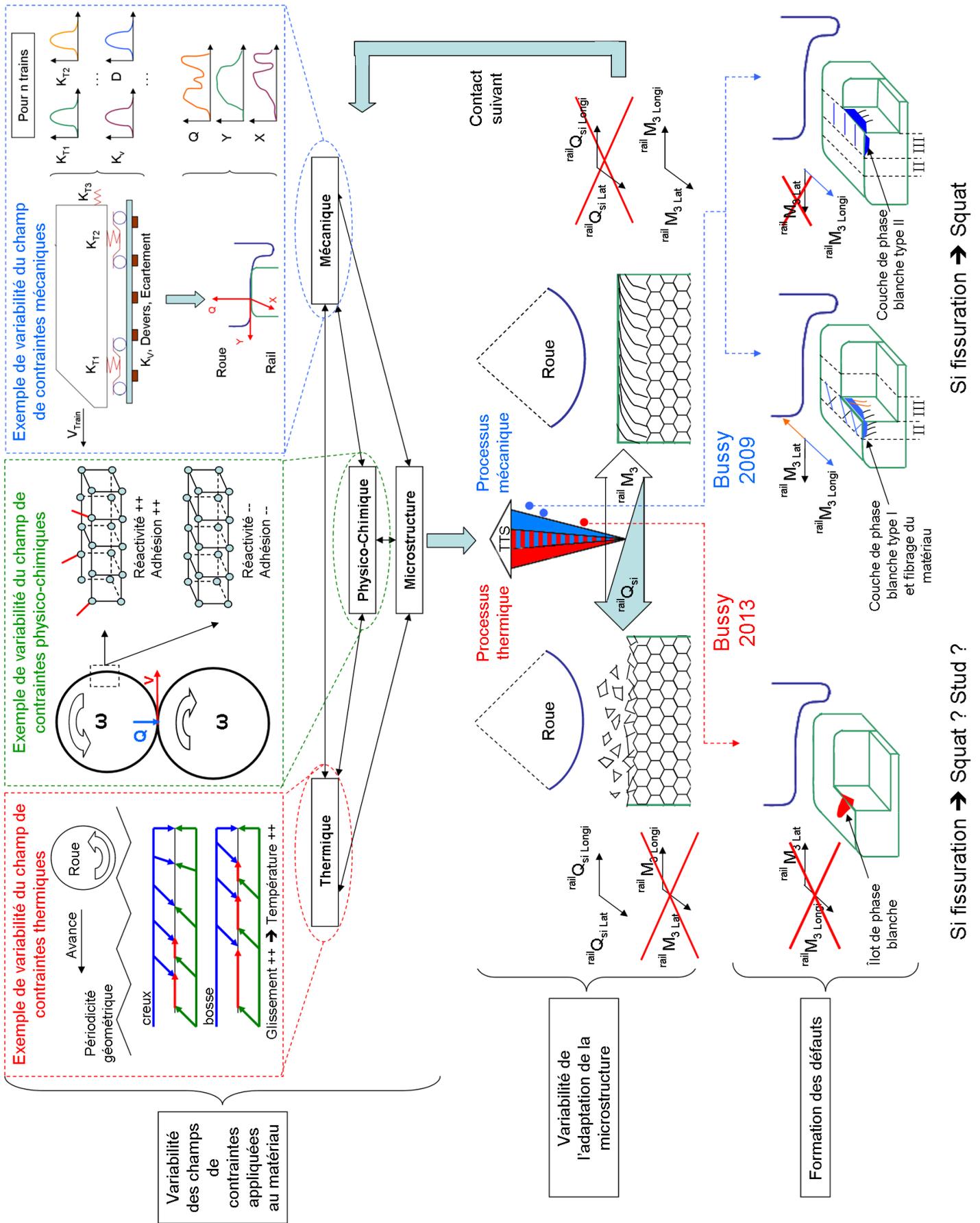


Figure VI.2-4 : Circuits tribologiques de formation du défaut de squat

Les différentes réponses tribologiques de l'acier à rail sur Bussy-St-Georges entre 2009 et 2013 illustrent que le squat est une conséquence spécifique d'un certain niveau de déformation plastique ($\epsilon_{rail}^{M_3}$) et de formation de phase blanche (TTS). Ces niveaux sont atteints car différents phénomènes se combinent pour qu'une majorité des volumes élémentaires représentatifs des couches superficielles se transforment (Énergie de diffusion $> Ep$) et/ ou se déforment (Énergie de cisaillement $< Rlim$). La nécessité d'une telle combinaison de facteur explique que le squat en colonie ne se développe que sur certaines zones. En effet, le terreau favorable à un tel développement est relativement rare à obtenir.

Paradoxalement, malgré cette faible occurrence, le schéma précédent illustre également le fait que la réponse tribologique de l'acier à rail donnant du squat (c'est-à-dire des niveaux énergétiques et de déformations spécifiques) peut être le résultat de différentes combinaisons de phénomènes. De multiples circuits tribologiques de formation du squat sont donc envisageables et peuvent expliquer la variété des différentes études référencées dans la bibliographie.

VI.2.3 Application aux cas référencés dans la bibliographie

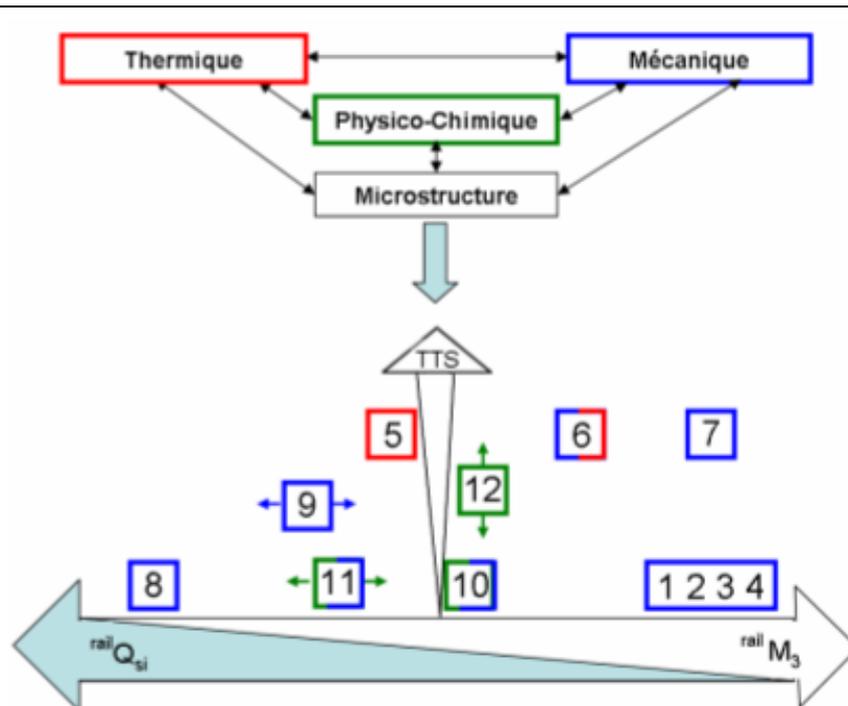
Le formalisme du contact roue-rail proposé précédemment permet de synthétiser la bibliographie (**Figure VI.2-5**) et de relier les principales catégories des phénomènes moteurs (répertoriés par les auteurs) aux réponses tribologiques observées dans les différentes études. Les caractéristiques classiques du squat sont également placées dans cette synthèse.

Chacune de ses études cible donc un phénomène participant à la réponse tribologique de rail et sans être exhaustif, le schéma précédent illustre l'étendue des différentes combinaisons de paramètres pouvant mener au squat. Les circuits tribologiques de formation du squat sont multiples et varieront d'une zone d'étude à l'autre suivant les phénomènes mécaniques, thermiques ou physico-chimiques dominants.

Dans ce travail de thèse, seul le circuit de formation dominé par un champ de contraintes mécaniques a été étudié : Un comportement inhabituel en traction du train entraîne sur la zone de Bussy-St-Georges d'importants efforts de cisaillement. Par analogie avec les essais sur machine bi-disques et le banc d'essais RHEOS, ces efforts peuvent expliquer, avec peut-être la présence de facilitateurs non identifiés, la formation d'une microstructure par bandes longitudinales caractérisée par l'accumulation de déformations plastiques et la formation de phase blanche. Cette différence de microstructures est tenue pour responsable de l'amorçage du squat.

Deux éléments de ce scénario nécessitent d'être approfondis :

- La représentativité du contact roue rail lors d'essais sur une machines bi-disques de fatigue ou RHEOS est limitée. L'équilibre de la réponse tribologique de l'acier à rail (déformation/détachement/transformation) s'en trouve ainsi perturbé. Il est alors nécessaire de modifier les conditions d'essai pour se rapprocher de la réponse tribologique de l'acier en rail soumis à la circulation ferroviaire. Le développement d'un banc d'essai plus représentatif du contact roue/rail paraît donc nécessaire.
- L'essai IRR illustre que l'association de petites variations de nombreux facteurs d'influence peut engendrer de fortes variations du champ de contraintes mécaniques. La prise en compte et la quantification de ces influences apparaît essentielle dans l'étude des défauts de fatigue de contact. Un sujet de thèse sur l'étude de la variabilité du champ de contraintes mécaniques sera prochainement proposé.



[1 2 3 4] font mention d'un cisaillement de la matière en surface associé au champ de contraintes mécaniques et se rapportant respectivement à l'effort de traction [JOH 89, KON 96, ISH 96, BUS 05], la dynamique en lacet du bogie [AKN 96], la raideur de la voie [LI 08b] et l'association à d'autres défauts géométriques [UIC 02, CLA 96]. Il n'est pas toujours fait mention de phase blanche dans ces études.

[5] se réfère aux études australiennes [PAL 13, DAN 13] et anglaises [FLE 13, GRA 13] précisant l'existence d'une phase blanche jugée d'origine thermique (en l'absence de déformation de la microstructure) sur le rail. Un défaut similaire au squat semble s'y développer.

[6] fait référence à l'étude de Steenbergen [STE 13] mentionnant l'existence d'une forte anisotropie du rail et de l'existence d'une phase blanche mécano-thermique dans les zones de squats : La déformation plastique du rail et la diffusion des atomes de carbone par le champ de contraintes mécaniques est facilitée par une élévation limitée de la température.

[7] concerne les études [CLA 82, GAV 03] évoquant la présence de phase blanche jugée d'origine mécanique à la surface du rail. La réponse tribologique du rail observée sur Bussy-St-Georges en 2009 (**Chapitre II**) se situerait entre [6] et [7].

[8] rappelle les publications [WOR 86, KAL 97, SRO 03] concernant le « taux d'usure magique » préconisé pour éviter la fatigue de contact. $^{mag}Q_{si}$ est ainsi artificiellement augmenté par un meulage préventif pour éviter que l'endommagement du rail $^{mag}M_3$ augmente au-delà de la limite de rupture en cisaillement du matériau.

[9] est lié aux études [BOU 04, STO 11a] analysant l'influence de la dureté de la nuance d'acier sur le débit d'usure. Pour un champ de contraintes mécaniques équivalent, les nuances de faibles duretés entraînent une augmentation du débit d'usure $^{mag}Q_{si}$.

[10] concerne l'apparition limitée des squats en tunnel [GRA 12]. Elle peut être liée à la fois à la technologie de pose de la voie (plateforme béton) et à des conditions de circulations différentes en tunnel et/ou une modification du potentiel physico-chimique lié à un environnement confiné.

[11] se rapporte aux publications de Cookson [COO 09] et Hardwick [HAR 13] qualifiant le rôle de l'environnement (en particulier la présence d'eau comme modificateur d'adhérence et d'adhésion) sur l'amorçage des fissures de fatigue et l'usure à la surface du rail.

[12] correspond aux études [GAV 03, STE 13] analysant l'influence des éléments d'alliage sur la stabilité des lamelles de cémentite. Cette variation de l'énergie de diffusion des atomes de carbone est susceptible de faciliter ou de ralentir la formation de phase blanche.

Figure VI.2-5 : Synthèse bibliographique

VI.3 Perspectives

Afin de mieux comprendre les conditions de contact roue/rail, de quantifier leurs variabilités ainsi qu'expliciter le paramètre R_{lim} défini précédemment, plusieurs études sont ainsi envisagées.

VI.3.1 Banc d'essais roue/rail : TriboRing

Pour étudier la fatigue de contact et qualifier des lois de comportements matériaux applicables à la réalité du contact roue/rail, la conception d'un banc d'essais, nommé TriboRing, est imaginée. Il est constitué d'un anneau circulaire représentant le rail sur lequel circulent une ou plusieurs roues pilotées en vitesse. Il est ainsi possible d'en contrôler le glissement et donc l'effort de cisaillement appliqué au rail.

Contrairement aux essais sur machines bi-disques, cette configuration galet/plan (et non galet/galet) des roues et du rail, permet d'avoir un développé des surfaces en contact suffisamment différent pour éviter une trop grande répétabilité du contact, ainsi qu'une éjection de particules par gravité. Les débits d'usure devraient ainsi être plus faciles à contrôler.

Le positionnement de la roue est pilotable pour assurer une bonne représentativité des situations de courbes et d'alignement. De plus, le diamètre de la roue est choisi petit devant le diamètre de l'anneau pour éviter un effet de spin trop important et ne pas s'éloigner des conditions de contact observées en voie.

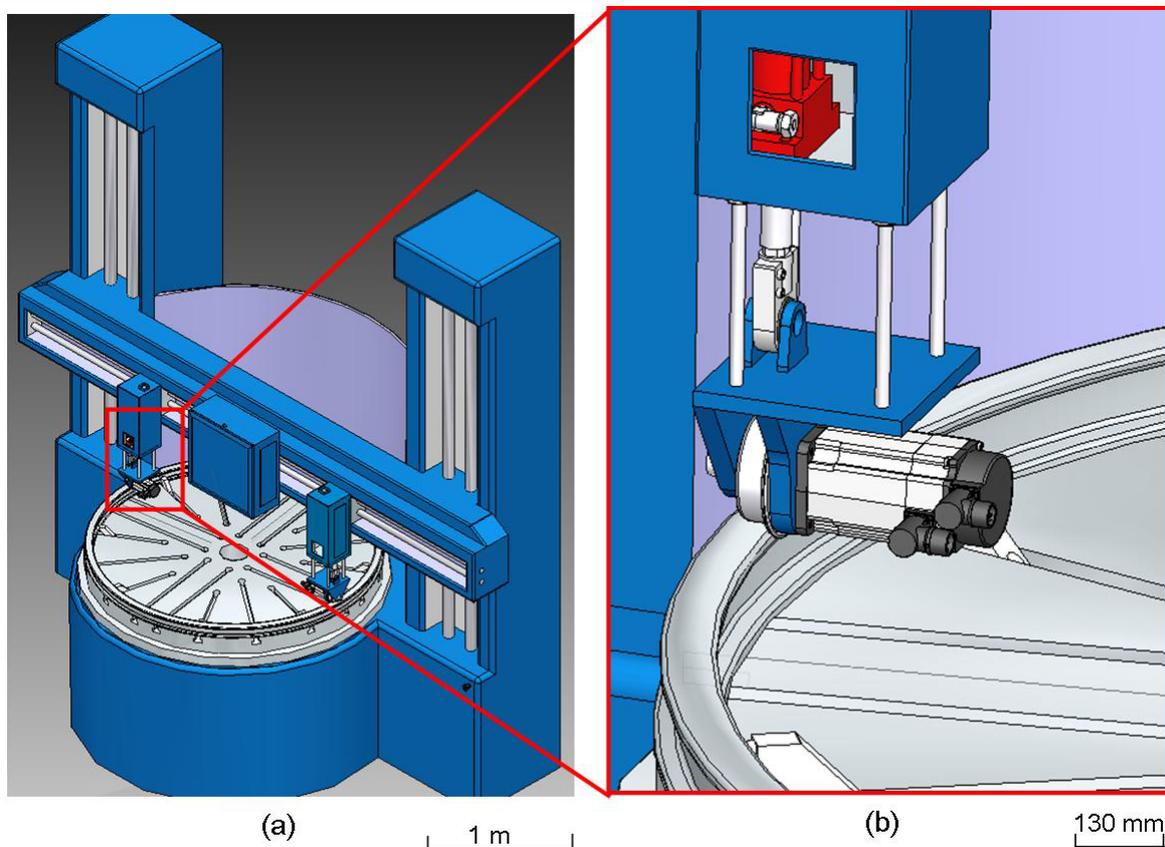


Figure VI.3-1 : (a) Vue générale du banc d'essais TriboRing, (b) Vue détaillée de la roue motorisée

VI.3.2 Etude de la variabilité des efforts de contact roue/rail

Les résultats de l'essai IRR illustrent l'importance de quantifier la variabilité des conditions d'entrée d'un calcul de dynamique ferroviaire et d'étudier leur influence sur les conditions de contact roue / rail.

Ainsi une première étude nécessite d'estimer la variabilité des paramètres (essentiellement sous forme de gaussiennes) liés à la voie, au train, à la roue et au rail susceptibles d'influencer les efforts de contact. Ces principaux paramètres sont listés dans le **Tableau VI.3-1**

Voie	Train	Roue	Rail
<ul style="list-style-type: none">• Raideurs de plateforme• Raideurs de traverses• Défauts de pose (dévers, écartement...)	<ul style="list-style-type: none">• Raideurs des suspensions• Niveau et répartition de la charge• Vitesse de circulation	<ul style="list-style-type: none">• Profil de la roue• Nuance d'acier de la roue	<ul style="list-style-type: none">• Profil du rail• Etat de lubrification• Nuance de l'acier à rail

Tableau VI.3-1 : Paramètres d'entrée d'un calcul de dynamique ferroviaire

Dans un second temps, il serait alors possible d'étudier, d'abord par tirages de Monte-Carlo, la distribution statistique des efforts de contact en fonction de la variabilité des paramètres d'entrée.

Références bibliographiques

- [AKN 96] P. AKNIN and al., *Contribution of railway dynamics codes to the understanding of the metallurgical behavior of the rail tread*, *Wear*, 191,126–213, 1996
- [ALW 13] F.A.M. ALWAHDI and al., *Subsurface microstructural analysis and mechanical properties of pearlitic rail steels in service*, *Wear*, 302, 1453–1460, 2013
- [ANT 10] G. ANTONI, *Transformations tribologiques de surface : Une approche thermo-mécanique*, Thèse de doctorat, Université de Provence Aix-Marseille I, 2010
- [ANT 13] G. ANTONI and al., *A tribo-mechanical model for TSTs based on TRIP, and numerical treatment*, In proceedings of the 40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology & Tribochemistry Forum 2013, Lyon, France, September 2013
- [ARC 58] J.F. ARCHARD, *The temperature of rubbing surfaces*, *Wear*, 2, 438-455, 1958
- [AYA 00] J.B. AYASSE, *Paramètres caractéristiques du contact roue-rail*, Rapport INRETS n°225, 2000
- [AYA 03] J.B. AYASSE, *Dynamique ferroviaire en coordonnées curvilignes*, Rapport INRETS n°245, 2003
- [AYA 05] J.B. AYASSE and al., *Determination of the wheel-rail contact patch in semi-Hertzian conditions*, *Vehicle System Dynamics*, 43, 455-483,2005
- [BAI 13] M.C. BAIETTO and al., *Fretting fatigue crack growth simulation based on a combined experimental and XFEM strategy*, *International Journal of Fatigue*, 47, 31-43, 01/2013
- [BAU 96] G. BAUMANN and al., *Formation of white etching layers on rail treads*, *Wear*, 191, 133–140, 1996
- [BER 88] Y.BERTHIER, *Mécanismes et tribologie*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et de l'Université Claude Bernard de Lyon, 1988.
- [BER 89] Y.BERTHIER, and al., *Velocity accomodation in friction*, *Tribology Transaction*, volume 32, Issue 4, 490-496, 1989
- [BER 95] Y. BERTHIER, *Maurice Godet's third body*, 22nd Leeds-Lyon symposium on tribology, Elsevier tribology series 31 3-19, 1995
- [BER 97] J.P. BERTRAND and al., *Phase blanche dans les rails – Caractères métallurgiques et approche mécaniques sur ses conditions de formation*, Rapport interne IRSID, MPM 97 N 1126, 1997
- [BLA 13] P. BLANCHARD, *Rapport de stage*, Insa de Lyon, 2013
- [BLA 91] P.BLANCHARD, *Usure induite en petits débattements : transformation tribologique superficielle d'alliages de titane*, thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1991
- [BLO 37a] H. BLOK, *Theoretical study of temperature rise at surface of actual contact under oiliness lubricating conditions*, *Proc. Of Inst. of Mechanical Engineers General Discussion on Lubrication*, Institution of Mechanical Engineers, London, Vol 2, 222-235, 1937.
- [BLO 37b] H. BLOK, *Measurement of temperature flashes on gear teeth under extreme pressure conditions*, *Proc. Gen. Discussion of Lubrication*, Institution of Mechanical Engineers, London, vol. 2, 14-20, 1937
- [BLO 63] H. BLOK, *The flash temperature concept*, *Wear*, 6, 483-494, 1963
- [BOG 96] S. BOGDANSKI and al., *Numerical stress analysis of rail rolling contact fatigue cracks*, *Wear*, 191, 14–24 1996

- [BOG 02] S. BOGDANSKI and al, *Modelling the three-dimensional behavior of shallow rolling contact fatigue cracks in rails*, *Wear*, 253, 17–25, 2002
- [BOG 05a] S. BOGDANSKI and al, *Experimental and theoretical investigation of the phenomenon of filling the RCF crack with liquid*, *Wear*, 258, 1280–1287, 2005
- [BOG 05b] S. BOGDANSKI, *Liquid–solid interaction at opening in rolling contact fatigue cracks*, *Wear*, 258, 1273–1279, 2005
- [BOH 03] A. BÖHMER and al., *Shakedown limit of rail surfaces including material hardening and thermal stresses*, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* Volume 26, Issue 10, 985–998, October 2003
- [BOL 91] P.E. BOLD and al., *Shear mode crack growth and rolling contact fatigue*, *Wear*, 144, 307–317, 1991
- [BOT 91] O. BOTSTEIN and al., *The microstructural changes in the surface of gun barrels*, *Wear* 142, 87-95, 1991
- [BOU 04] D. BOULANGER, *Corus rail process and product developments*, Rapport Corus, 2004
- [BOW 52] F.B. BOWDEN, *Discussion sur le frottement*, Proc. Royal Society A212, 446, 1952
- [BOW 88] A.F. BOWER, *The influence of crack face friction and trapped fluid on surface initiated rolling contact fatigue cracks*, *Transactions of the ASME: Series F, Journal of Tribology*, 110, 704-711, 1988
- [BUL 91] R. BULPETT, *The characterisation of white etching layers formed on engineering steels*, Thèse de doctorat, Experimental technique Centre, Brunel University, 1991
- [BUS 05] M. BUSQUET and al., *3D finite element investigation on the plastic flows of rolling contacts–correlation with railhead microstructural observations*, *Wear*, 258, 1071–1080, 2005
- [BUS 09] M. BUSQUET and al., *Formation conditions of mechanically modified superficial structures for two steels*, *Tribology international*, 42, 1730-1743, 2009
- [CAN 96] D.F. CANNON and al., *Rail rolling contact fatigue research by the European Rail Research Institute*, *Wear* 191, 1–13, 1996
- [CAN 03] D.F. CANNON and al, *Rail defects : An overview*, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 26, 865-886, 2003
- [CAR 05] R.I. CARROLL, *Surface Metallurgy and Rolling Contact Fatigue of Rail*, Thèse de doctorat, University of Sheffield, 2005.
- [CAR 07] R.I. CARROLL and al., *Rolling contact fatigue of white etching layer: Part 1. Crack morphology*, *Wear*, 262, 1253–1266, 2007
- [CAR 26] F. W. CARTER, *On the Action of a Locomotive Driving Wheel*, Proc. of the Royal Society, Serie A112, London, 151-157, 1926
- [CAR 59] H.S. CARSLAW and al., *Conductions of heat in solids*, Oxford University Press, 1959
- [CAR 01] M. CARTIER and al., *Usure des contacts mécaniques*, Techniques de l'ingénieur, BM5061 à BM5065, 2001
- [CAM 02] J. CAMPEDELLI, *Modélisation globale statique des systèmes mécaniques hyperstatiques pré-chargés – Application à un bogie moteur*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.
- [CHU 92] W.Y. CHUNG and al., *Fundamental limits of flash temperatures measurements of asperities using infrared detector*, *Tribology Transactions*, 35, 447-450, 1992

- [CLA 82] P. CLAYTON and al., *Metallurgical aspects of surface damage problems in rails*, Canadian Metallurgical Quarterly 21, 31–46, 1982
- [CLA 83] P. CLAYTON and al., *Surface damage phenomena in rails*, Proceedings of the Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/wheel Systems, Vancouver, British Columbia, July 6–9, 1982, pp. 419–43. University of Waterloo Press, 1983.
- [CLA 87] P. CLAYTON and al., *Rolling contact fatigue of a rail steel*, Wear, 117, 319-334, 1987
- [CLA 96] P. CLAYTON, *Tribological aspects of wheel–rail contact: a review of recent experimental research*, Wear, 191, 170–183, 1996
- [CON 12] L. CONREAUX, *Rapport de stage d’application*, Ecole Centrale Lyon, 2012
- [COO 09] J. M. COOKSON and al., *The role of the environnement in the rolling contact fatigue cracking of rails*, 2009, In Proceedings of the 8th International Conference on Contact mechanics and wear of rail/wheel systems, Firenze, Italy, September 15-18, 2009
- [COU 68] R. COURTEL, *Frottement. Lubrification. Usure. Connaissance de base, Techniques de l’ingénieur*, B585, 1968.
- [DAN 94] K. DANG VAN and al., *Thermomechanical state near rolling contact area*, Dissipative Processes in Tribology, 27, 423-428, 1994
- [DAN 96] K. DANG VAN and al., *Elastoplastic analysis of repeated moving contact. Application to railways damage phenomena*, wear, 196, 77-81, 1996
- [DAN 02] K. DANG VAN and al., *On some recent trend in modelling of contact fatigue and wear in rail*, Wear 253, 219–227, 2002
- [DAN 08] K. DANG VAN, *Modelling of damage induced by contacts between solids*, Comptes Rendus Mecanique 336, 91–101, 2008
- [DAN 13] W. DANIEL, *Rail squats : progress in understanding the Australian experience*, Proc ImechE Part F: J Rail and Rapid Transit, 227, 481-492, 2013
- [DAY 10] C. DAYOT and al, *Suivi et expertise tribologique de squats RER A entre Torcy et Marne la Vallée Chessy – Site de Bussy St Georges – Rapport d’expertise en laboratoire*, version 4, février 2010
- [DAY 12] C. DAYOT and al., *Tribological behaviour of Pearlitic and Bainitic steel grades under various sliding conditions*, Tribology international, 46, 128-136, 2012
- [DER 93] R. DEROCHE and al., *Rolling contact fatigue cracks on SNCF conventional tracks*, in: J.J. Kalker (Ed.), Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation, Kluwer, Dordrecht, 435–448, 1993
- [DON 05] G. DONZELLA and al., *The competitive role of wear and RCF in a rail steel*, Engineering Fracture Mechanics, 72, 287-308, 2005
- [EKB 05] A. EKBERG and al., *Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading—an overview*, Wear, 258, 1288-1300, 2005
- [ELE 99] A. ELEOD and al., *Conception of numerical and experimental tools for study of the tribological transformation of surface (TTS)*, in: D. Dowson (Ed.), Lubrication at the Frontier, Proceedings of the 25th Leeds–Lyon Symposium on Tribology. Tribology Series, vol. 36, Elsevier, 673–682, 1999
- [EDA 81] H. EDA and al., *The formation mechanism of ground white layers*, Bulletin Japanese Society of Mechanical Engineers, 24, 743-747, 1981
- [ERT 02] M. ERTZ and al., *A comparison of analytical and numerical method for the calculation of temperatures in wheel/rail contact*, Wear, 253, 498-508, 2002

- [ERT 03] M. ERTZ and al., *Thermal stresses and shakedown in wheel rail contact*, Archive of Applied Mechanics, 72, 715-729, 2003
- [EVA 12] M.H. EVANS, *White structure flaking (WSF) in wind turbine gearbox bearings : effect of 'butterflies' and white etching cracks (WECs)*, Materials Science and Technology, 28, 3-22, 2012
- [FEL 07] E. FELDER, *Plasticité en mise en forme – Métaux à froid*, Techniques de l'ingénieur, m3004, 2007
- [FIS 03] F.D. FISCHER, and al., *On the temperature in the wheel rail rolling contact*, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 26, 999-1006, 2003
- [FLE 99] D. I. FLETCHER, *The influence of lubrication on the fatigue of pearlitic rail steel*, these de doctorat, Université de Sheffield UK, 1999
- [FLE 13] D.I. FLETCHER and al., *Simulation study of thermally initiated rail defects*, In press, available online, 2013.
- [FRA 01] F.J. FRANKLIN and al., *Computer simulation of wear and rolling contact fatigue*, Wear, 251, 949-955, 2001
- [FRA 03] F.J. FRANKLIN and al., *Ratchetting and fatigue-led wear in rail-wheel contact*, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 26, 949-955, 2003
- [FRA 07] F.J. FRANKLIN and al., *Modelling wear and crack initiation in rails*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F (Journal of Rail and Rapid Transit), 221, 23-33, 2007
- [FRA 08] F.J. FRANKLIN and al., *Modelling rail steel microstructure and its effect on crack initiation*, Wear, 265, 1332-1341, 2008
- [GAR 08] J.E. GARNHAM and al., *The role of deformed rail microstructure on rolling contact fatigue initiation*, Wear, 265, 1363–1372, 2008
- [GAR 09] J.E. GARNHAM and al., *Very early stage rolling contact fatigue crack growth in pearlitic rail steels*, in: Proceedings of the 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM 2009), Italy, September 2009.
- [GAV 03] V.G. GAVRILJUK, *Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation*. Mater Sci Eng A, 345, 81-89, 2003
- [GOD 78] M. GODET, *Les fondements mécaniques de la tribologie*, Mécanique Matériaux Electricité, 1972.
- [GOD 84] M. GODET, *The third body approach : a mechanical view of wear*, Wear, 100, 437-452, 1984.
- [GRA 05] S.L. GRASSIE, *Rolling contact fatigue on the British railway system: treatment*, Wear 258, 1310–1318, 2005
- [GRA 09] S.L. GRASSIE, *Commentaire oral de S.T.L Grassie*, 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM 2009), Italy, September 2009
- [GRA 11] S. L. GRASSIE and al., *'Studs': a squat-type defect in rails*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F (Journal of Rail and Rapid Transit), 225, 2011,
- [GRA 12] S. L. GRASSIE, *Squats and squat-type defects in rails: the understanding to date* Proc. Inst. Mech. Eng. Part F (Journal of Rail and Rapid Transit), 226, 235-242, 2012
- [GRA 13] S. L. GRASSIE and al., *Telling the difference between studs and squats*, Railway Gazette International, August 2012
- [GRI 85] B.J. GRIFFITHS, *White layer formation at machined surfaces and their relationship to white layer formation at worn surfaces*, Transaction of the ASME, Series F, Journal of Tribology, 107, 165-171, 1985

- [GRI 87] B.J. GRIFFITHS, *Mechanisms of white layer generation with reference to machining and deformation processes*, Transaction of the ASME, vol 109, 525-530, 1987
- [GUI 94] P. GUIRALDENQ, *Diffusion dans les métaux*, Techniques de l'ingénieur, m55, 1994
- [HAI 63] J. HAINES and al., *Contact stress distribution on elliptical contact surfaces subjected to radial and tangential forces*, Proc. Int. Mech. Eng., 177, 95-114, 1963
- [HAJ 05] A.H. HAJ MOURAD, *Analyse physique de la formation des transformations tribologiques superficielles – Cas des matériaux métalliques sollicités sur un dispositif à enclumes opposées de “Bridgman”*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.
- [HAL 12] A. HALLOUMI, *Rapport sur les essais de torsion sous haute pression imposée de l'acier à rail R260*, version 2, Septembre 2012
- [HAR 13] C. HARDWICK and al., *Wheel and Rail Wear – Understanding the effects of water and grease*, Wear, In press, Available online, 2013
- [HCC 00] House of Common Committee, *The loss of strength in steel rails through use on railways*, Sessional Papers, LXXVI part 1, 553-718, 1900
- [HER 82] H. HERTZ, *Über die Berührung fester elastischer Körper*, Journal für reine und angewandte Mathematik, Vol 92, 156-171, 1882
- [ISH 96] M. ISHIDA and al., *Experimental study on rolling contact fatigue from the aspect of residual stress*, Wear 191, 65–71, 1996
- [IWN 06] S. IWNICKI and al., *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, Chapter 4, Wheel-Rail Contact, CRC Press, 2006.
- [JAC 96] P.JACQUEMARD, *Tribologie des joints à faces radiales : cas du fonctionnement en lubrification mixte et de premiers corps en carbone et carbure de silicium*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1996
- [JEA 42] J.C. JEAGER, *Moving sources of heat and the temperature of sliding contacts*, Journal and Proc. R. Soc N.S.W., 76, 203-224, 1942
- [JOH 63] K.L. JOHNSON and al., *Plastic flow and residual stresses in rolling and sliding contact*, Proceedings of the Symposium on Fatigue in Rolling Contact, Institution of Mechanical Engineers, London, 54-65, 1963
- [JOH 85] K. L. JOHNSON, *Contact Mechanics*, Cambridge : Cambridge University Press, 452p, 1985
- [JOH 89] K.L. JOHNSON, *The mechanics of plastic deformation of surface and sub-surface layers in rolling and sliding contact*, Key Engineering Materials, 33, 17–34, 1989
- [KAL 70] D. KALISH and al., *Structural changes and strengthening in the straintempering of martensite*, Materials Science and Engineering, 6, 156-166, 1970
- [KAL 67] J.J. KALKER, *On the rolling contact of two elastic bodies*, Thèse de Doctorat, DELFT : université de DELFT, 155 p. , 1967
- [KAL 91] J.J. KALKER, *Wheel-rail rolling contact theory*, Wear, 144, 243-261, 1991
- [KAL 92] J.J. KALKER, *Modification of the Two-Body Contact Conditions to Account for the Third Body*, 18th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, 183-189, 1992
- [KAL 97] J. KALOUSEK and al., *Achieving a balance: the magic wear rate*, Railway Track Structure, 1997
- [KAP 92] A. KAPOOR, *Effect of changes in contact geometry on shakedown of surfaces in rolling/sliding contact*, International Journal of Mechanical Sciences, 34, 223-239, 1992

- [KAP 94] A. KAPOOR and al., *Plastic ratchetting as a mechanism of metallic wear*, Proceedings of the Royal Society, A445, 367-381, 1994
- [KAP 00] A. KAPOOR and al., *Tribological layers and the wear of ductile materials*, Wear, 245, 204-215, 2000
- [KER 08] M. KERR and al., *The epidemiology of squats and related defects*, Conference on railways engineering engineers. Australia: Perth; 2008. p. 83– 96, 2008
- [KIK 96] W. Kik and al., *A fast, approximate method to calculate normal load at the contact between the wheel and rail and creep forces during rolling*, Proceedings, 2nd mini conf. on contact mechanics and wear of wheel/rail systems, ed. Zobory, TU Budapest, 1996
- [KNO 95] K. Knothe and al., *Determination of temperatures for sliding contact with applications for wheel-rail systems*, Wear, 189, 91-99, 1995
- [KON 96] K. KONDO and al., *Cause, increase, diagnosis, countermeasures and elimination of Shinkansen shelling*, Wear, 191, 199–203, 1996
- [KOU 09] G. KOUROUSSIS, *Modélisation des effets vibratoires du trafic ferroviaire sur l'environnement*, Thèse de doctorat, Faculté polytechnique de Mons, 2009
- [KRA 99] G. KRAUSS, *Martensite in steel : strength and structure*, Materials Science and Engineering, 273-275, 40-57, 1999
- [KUZ 63] V. KUZNETSOV and al., *Some features of the structure of white layers*, Physics of Metals and Metallography, 15 (1), 135-137, 1963
- [LAC 12] G. LACROIX, *MI2N-RATP – Efforts à la jante – Anti-Patinage*, Rapport interne, 2012
- [LEM 12] T. LEMARECHAL, *Rapport de stage d'application*, Ecole Centrale de Lyon, 2012
- [LI 08a] Z. LI and al., *Esveld XZC, Dollevoet R, Molodova M. An investigation into the causes of squats – correlation analysis and numerical modeling*. Wear, 265, 1349–1355, 2008
- [LI 08b] Z. Li, X. Zhao, R. Dollevoet, M. Molodova, *Differential wear and plastic deformation as causes of squat at track local stiffness change combined with other track short defects*, Vehicle System Dynamics 46 (1), 237–246, 2008
- [LI 09] Z. Li, *The determination of a critical size for rail top surface defects to grow into squats*, Proceedings of the 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM 2009), Firenze, Italy, September 15–18, 2009.
- [LIN 05] V. LINCK, *Modélisation numérique temporelle d'un contact frottant – Mise en évidence d'instabilités locales de contact – Conséquences tribologiques*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.
- [LIN 06] V. LINCK and al., *Consequence of contact local kinematics of sliding bodies on the surface temperatures generated*, Tribology International, 39, 1664–1673, 2006
- [LOJ 01a] W. LOJKOWSKI and al., *The mechanical properties of the nanocrystalline layer on the surface of railway tracks*, Material Science and Engineering A, 303, (1-2), 209-215, 2001
- [LOJ 01b] W. LOJKOWSKI and al., *Nanostructure formation on the surface of railway tracks*, Material Science and Engineering A, 303, (1-2), 197-208, 2001
- [LOU 10a] P. LOURS, site internet, nte.enstimac.fr/SciMat/, *Module Science des Matériaux – Les défauts dans les solides - Les défauts linéaires – Description géométrique*, 1.6, 2010

- [LOU 10b] P. LOURS, site internet, nte.enstimac.fr/SciMat/, *Module Science des Matériaux – Les défauts dans les solides - Les défauts linéaires – Mouvement des dislocations*, 1.6, 2010
- [MET 13] Metallurgical Technologies Inc., *Failure analysis of ball bearings*, <http://www.met-tech.com/failure-analysis-of-ball-bearings.html>, 2013
- [MAG 08] E. MAGEL and al., *Traction, forces, Wheel climb and damage in high-speed railway operations*, *Wear*, 265, 1446–1451, 2008
- [MAT 13] A. MATSUMOTO and al., *Actual states of wheel/rail contact forces and friction on sharp curves – Continuous monitoring from in-service trains and numerical simulations*, *Wear*, In press, Available online 2013.
- [MIT 99] S. MITAO and al., *High strength bainitic steel rails for heavy haul railways with superior damage resistance*, *Proceedings of IHHA STS Conference on Wheel/Rail Interface*, Moscow, Russia, 489-496, 1999
- [MOY 03] S. MOYLAN and al., *A new approach for studying mechanical properties of thin surface layers affected by manufacturing processes*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering: Series B, Transactions of A.S.M.E.*, 125, (2), 310-315, 2003
- [MUR 98] G. MURRY, *Transformations dans les aciers*, *Techniques de l'ingénieur*, M1115, 1998
- [NAK 65] R. Nakamura and al. , *The rail shelly crack in Japan*, *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute of National Railways* 6 (3), 34–44, 1965
- [NAK 91] R. NAKKALIL, *Formation of adiabatic shear bands in eutectoid steels in high strain rate compression*, *Acta Metallurgica et Materialia* 39, 2553–2563, 1991
- [NAU 61] F.K. NAUMANN, *Gefügeuntersuchungen an verriffelten Schienen*, *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, 617-626, 1961
- [NEW 84] S.B. Newcomb and al., *A transmission electron microscopy study of the white etching layer on a rail head*, *Materials Science and Engineering*, 66, 195–204, 1984
- [NIC 01] E. NICCOLINI, *Adhérence roue/rail en traction – Réalité tribologique en conditions de démarrage*, *Thèse de doctorat*, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001
- [NOR 10a] NORNE FRANCAISE, NF EN 13803-1, *Applications ferroviaires - Voie - Paramètres de conception du tracé de la voie - Écartement 1435 mm et plus large - Partie 1 : voie courante*, Afnor, Septembre 2010
- [NOR 10b] NORME FRANCAISE, NF EN 13848-5+A1, *Applications ferroviaires - Voie - Qualité géométrique de la voie - Partie 5 : niveaux de la qualité géométrique de la voie - Voie courante*, Afnor, Juillet 2010
- [NOR 10c] NORME FRANCAISE, NF EN 13674-4+A1, *Applications ferroviaires - Voie - Rails - Partie 4 : rails Vignole de masse comprise entre 27 kg/m et 46 kg/m, 46 kg/m non compris*, Afnor, Janvier 2010
- [NVT 11] NVT, *Rapport technique – Projet Interface Rail-Roue – Revision B*, 2011
- [OKU 78] K. OKUSA and al., *Behaviour of white etching layer during cutting of iron and steels*, *Bulletin Japanese Society of Precision Engineering*, 12, 171-176, 1978
- [OST 01] W. ÔSTERLE and al., *Investigation of white etching layers on rails by optical microscopy, electron microscopy, x-ray and synchrotron x-ray diffraction*, *Materials Science and Engineering A*, 303, 150-157, 2001

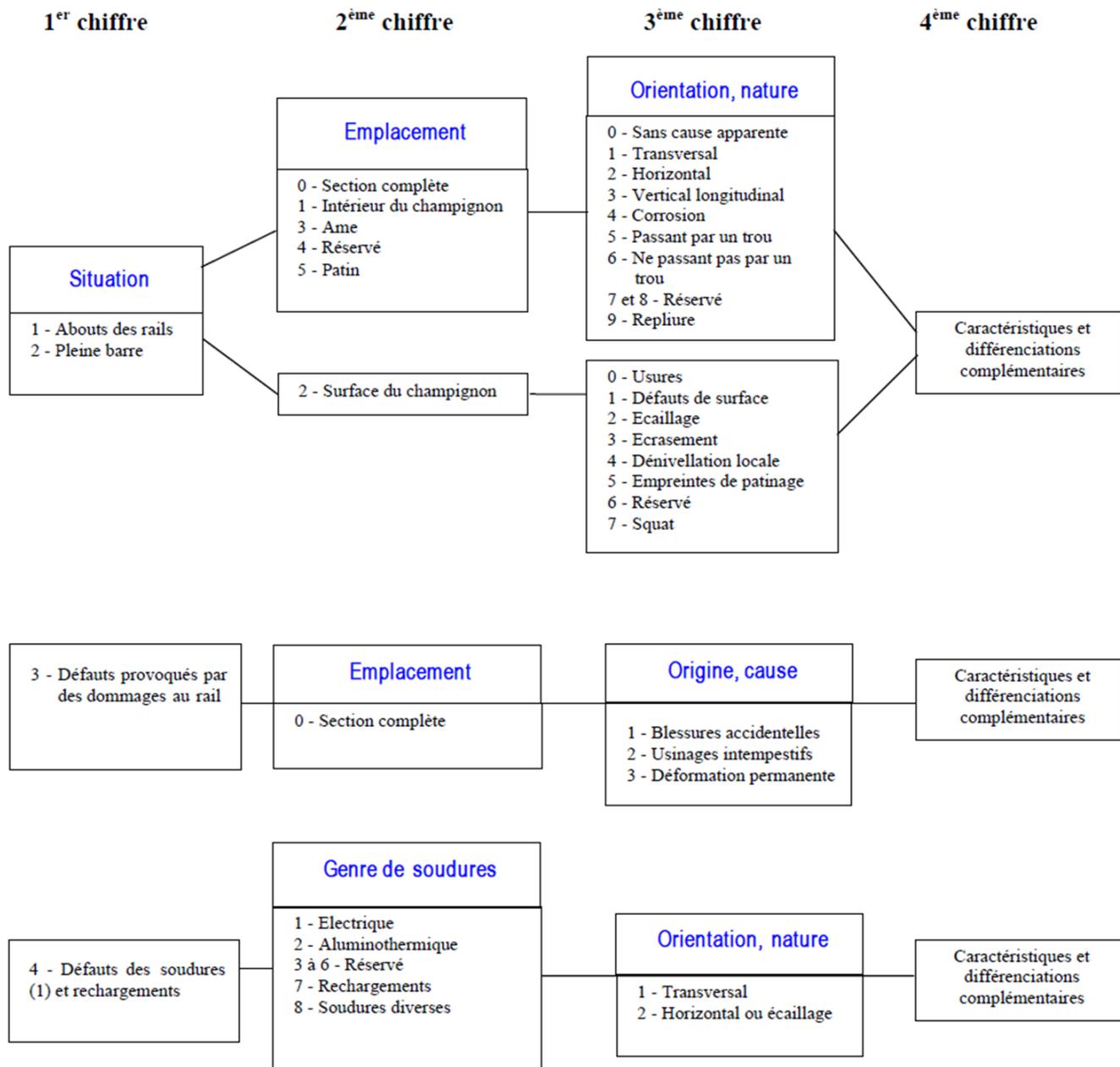
- [PAL 12] S. PAL and al., *Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation*, *Wear* 284–285, 30–42, 2012.
- [PAL 13] S. PAL, *Early stages of rail squat formation and the role of a white etching layer*, *International Journal of Fatigue*, 52, 144–156, 2013
- [PAU 02] M. PAU and al., *Distribution of contact pressure in wheel–rail contact area*, *Wear*, 253, 265-274, 2002
- [PEL 08] C. PELISSIER, *Etude d'une nouvelle méthode de validation de la sécurité au déraillement des matériels roulants fer*, Rapport de stage de fin d'étude, ISITL – Université Claude Bernard Lyon 1, 2008
- [POK 02] A. POKORNY, *Fractographie – Morphologie des cassures*, Techniques de l'ingénieur, M4121, 2002
- [PYZ 01] A. PYZALLA and al., *Changes in microstructure – Texture and residual stresses on the surface of a rail resulting from friction and wear*, *Wear*, 251, 901-907, 2001
- [QUO 05] X. QUOST, *Modélisation de l'effet du vent sur les trains à grande vitesse – Etude dynamique et stochastique appliquée aux risques de renversement*, thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2001
- [RAT 10] X. QUOST and al., *Synthèse des zones squat – RATP*, rapport interne, 2010
- [REY 86] O. REYNOLDS, *On the theory of lubrication and its application to Mr beauchamps tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil*, *Phil. Trans. Roy. Soc. Of London*, vol 177, p157-234, 1886
- [RIC 05] H.A. RICHARD and al, *Fracture in a rubber-sprung railway wheel*, *Engineering Failure Analysis*, vol 12, p 986–99, 2005
- [RIC 08] H.A. RICHARD and al., *Development of fatigue crack growth in real structures*, *Engineering Fracture Mechanics*, vol 75, p331–340, 2008
- [RIG 86] D.A. RIGNEY and al., *Low energy dislocation structures caused by sliding and particle impact*, *Materials Science and Engineering*, 81, 409–425, 1986
- [RIN 00] J.W. RINSBERG, and al., *Prediction of fatigue crack initiation for rolling contact fatigue*, *International Journal of Fatigue*, vol 22, 205-215, 2000
- [RIN 01] J.W. RINSBERG, *Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation*, *International Journal of Fatigue*, vol 23, 575-586, 2001
- [RIN 05] J.W. RINSBERG, *Shear mode growth of short surface breaking RCF cracks*, *Wear*, 258, 955-963, 2005
- [SAU 05] A. SAULOT, *Analyse tribologique du contact roue-rail – Modélisations et expérimentations – Cas de l'usure ondulatoire*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005
- [SAU 97] E. SAUGER, *Contribution à l'étude de la transformation tribologique superficielle en fretting*, thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1997
- [SEB 12] M. SEBES and al., *A fast simplified wheel-rail contact model consistent with perfect plastic materials*, *Vehicle System Dynamics*, vol 50 N° 7-9, 2012
- [SEK 00] A.C. SEKKAL, *Etude des transformations tribologiques de surfaces ou TTS induites par des impacts à énergie contrôlée*, thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2000
- [SCH 12] M. SCHILKE, *White etching layers on the Stockholm local traffic network*, *Proceedings of the 9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM 2012)*, China, September 2012

- [SIM 13] SIMON and al., *Tribological characterization of rail squat defects*, *Wear* 297, 926–942, 2013
- [SNA 39] W.H. SNAIR and al., *The white layer structure in the erosion of machine gun barrels*, *Transactions of the ASM*, 27, 608-624, 1939
- [SNC 02] SNCF, *Référentiel infrastructure – Procédure – Codification des défauts de rails*, IN 0285, 2002
- [SRO 03] P. SROBA, *Rail grinding best practices*, *Proceedings AREMA annual conference*, 2003
- [STE 12] J.W. STEAD, *Micro-metallography and its practical applications*, *J. West. Scott. Iron Steel Inst.* 19, 169–204, 1912
- [STE 13] M. STEENBERGEN, *On the mechanism of squat formation on train rails – Part I: Origination*, *International Journal of Fatigue*, 47, 361-372, 2013
- [STO 11a] R. STOCK and al., *RCF and wear in theory and practice – The influence of rail grade on wear and RCF*, *Wear*, 271, 125-133, 2011
- [STO 11b] A. STORMVINTER and al., *Investigation of Lath and Plate Martensite in a Carbon Steel*, *Solid State Phenomena*, 61, 172-174, 2011
- [SUZ 91] S. SUZUKI and al., *The detection of flash temperatures in sliding contact by method of Tribo-induced Thermoluminescence*, *Journal de Tribologie*, Vol 113, 120-127, 1991
- [SUR 03] S. SURESH, *Fatigue of materials*, 2nd Editions, Cambridge University Press, UK, 2003
- [SZC 11] P. SZCZEPANIAK, *Chargement realise sur la ZRBX paire et ZAB – RAME 3503 – Essai Interface Roue/Rail*, *Rapport interne RATP*, 2011
- [TAN 80] M.A. TANVIR, *The temperature rise due to slip between wheel and rail : an analytical solution for Hertzian contact*, *Wear*, 61, 295-308, 1980
- [TAT 13] TATASTEEL, *Rail technical guide*, disponible sur le site internet www.tatasteelrail.com, 2013
- [THO 02] B. THOMAS and al., *Durcissement des aciers – Mécanismes, Techniques de l'ingénieur*, m4340, 2002
- [TIA 94] X. TIAN and al., *Maximum and average flash temperatures in sliding contact*, *Journal of tribology*, 116, 167-174, 1994
- [TOM 88] W.J. TOMLINSON, *Running-in wear of white layers formed on EN24 steel by centreless grinding*, *Wear*, 128, 83-93, 1988
- [TRE 41] E.M. TRENT and al., *The formation and properties of martensite on the surface of rope wire*, *Journal of the Iron and Steel Institute*, 143, 1941
- [TRO 13] B. TROLLE and al., *X-FEM crack propagation under rolling contact fatigue accounting for actual residual stress in the rail*, *Proceedings WCRR*, Sydney, 2013
- [TUR 75] D. M. TURLEY, *The nature of white layers produced during reaming ultra-high strength steel*, *Material Science and Engineering*, 19, 76-86, 1975
- [TYF 95] W.R. TYFOUR, *Interaction between wear and rolling contact fatigue in pearlitic rail steels*, *Thèse de doctorat*, Department of Engineering, Université de Leicester, 1995
- [TYF 96] W.R. TYFOUR and al., *Deterioration of rolling contact fatigue life of pearlitic rail steel due to dry–wet rolling–sliding line contact*, *Wear*, 197, 255–265, 1996
- [UIC 02] UIC 712R, *Catalogue des défauts de rail*, 4^{ème} édition de Février 2002

- [WIK 13] Wikipédia, *Article : Acier, Partie : Structures des aciers*, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Acier>, 2013
- [WIL 03] E. WILD and al., *Microstructure alterations at the surface of a heavily corrugated rail with strong ripple formation*, *Wear*, 254, 876-883, 2003
- [WON 96] S.L. WONG and al., *A branch criterion for shallow angled rolling contact fatigue cracks in rails*, *Wear*, 191, 45–53, 1996
- [WOR 86] A.W. WORTH and al., *Prolonging rail life through rail grinding*, Proceedings of the Third International Heavy Haul Railway Conference, Paper IB9, Vancouver, 1986
- [ZAN 92] Y. ZANHOU and al., *Application of pseudocastics experiment method in research of wheel–rail contact stress*, Proc. of the International Wheelset Congress, Sydney, 257–263, 1992
- [ZER 09] U. ZERBST and al., *Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review*, *Engineering Fracture Mechanics* 76, 2563-2601, 2009
- [ZIT 11] S. ZITOUNI, *Caractérisation approfondie du contact roue/rail*, Rapport de stage de fin d'étude, Insa de Lyon, 2011
- [ZIT 12] S. ZITOUNI, *Analyse des transformations tribologiques de surface sur tribomètre*, Mémoire de Master en génie mécanique, Insa Lyon, Septembre 2012

Annexe A : Codification UIC

SCHEMA DE LA CODIFICATION DES DEFAUTS DE RAILS



(1) Défauts consécutifs à l'élaboration des soudures électriques ou aluminothermiques. Par contre, un défaut apparaissant dans la zone de soudure mais ayant une origine externe sera désigné selon la codification propre à sa nature.

Figure 1: Schéma de codification des défauts de rails [SNC 02, UIC 02]

Annexe B: Essais de fraisage

Pour étudier ce réseau de fissures dans le volume sur un nombre statistiquement exploitable de défauts, plusieurs centaines de squats ont été prélevées sur différents du réseau et fraisées en surface progressivement.

B.1. Détails expérimentaux

Deux opérations de fraisage ont été menées : un fraisage industriel classique sur site à l'aide un train fraiseur industriel et un fraisage plus fin et mieux contrôlé en laboratoire.

B.1.1. Sites de prélèvements

Dans l'optique d'établir une vue fidèle et globale du développement du squat sur le réseau RATP, les prélèvements ont été effectués à partir de cinq sites différents. Ces sites sont tous affectés par une densité similaire de squats (supérieure en moyenne à 5 squats par mètre) dont les longueurs longitudinales varient entre 10 et 150 mm. La longueur du squat est définie comme la longueur de l'axe de l'ellipse dans la direction de circulation (**Figure 2**).

Les caractéristiques concernant la voie et le mode de circulation de ces différentes zones sont données dans le **Tableau 1**.

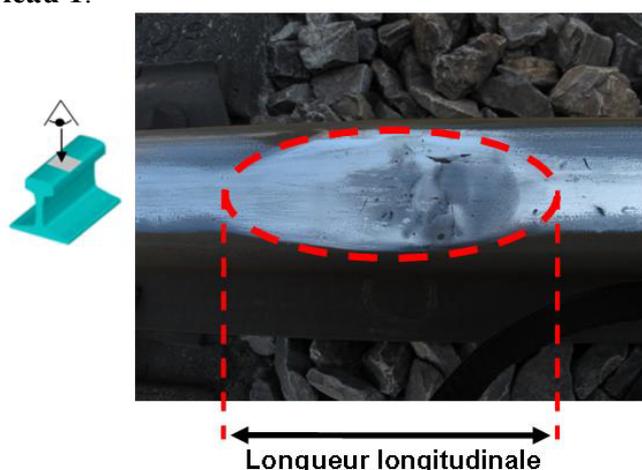


Figure 2 : Définition de la longueur d'un squat

Il est important de noter que des opérations de meulage correctif ont été réalisées sur les sites 3 à 5 dans l'année précédent le meulage. L'aspect de surface de ces défauts ne correspondait donc pas à leur « état naturel ».

		Site 1:	Site 2:	Site 3:	Site 4:	Site 5:
Données Voie	Profil de rail	60E1	60E1	60E1	60E1	60E1
	Nuance d'acier	R260*	R260	R260	R260	R260
	Géométrie de la voie	Grand rayon	Alignement	Alignement	Alignement	Alignement
	Type de pose	Ballast	Ballast	Ballast	Ballast	Ballast
	Traverses	Bois	Bi-blocs	Bi-blocs	Bi-blocs	Bi-blocs
	Dernier meulage	2009	2006	2009	2008	2009
	Date de pose	2008	2006	2006	2008	2006
Données Véhicule	Type de train	MI2N / MI84 /MS61	MI2N / MI84	MI2N / MI84	MI2N / MI84	MI2N / MI84
	Charge à l'essieu (T)	18 / 14 / 12	18 / 14	18 / 14	18 / 14	18 / 14
Conditions de circulation	Vitesse (km/h)	60-70 Freinage	80-90 Freinage	110-120 Traction	80-90 Freinage	80-90 Traction
	Chargement quotidien (T)	160 000	60 000	60 000	60 000	60 000

Tableau 1 : Descriptif des zones de prélèvement

B.1.2. Fraisage industriel

Pour l'opération de fraisage sur squats avec train fraiseur, 10 rails de 36m ont été sélectionnés dans les zones 2 à 5 du tableau 1 sur la base de trois critères : le nombre de squats, la diversité de niveau de développement des défauts et la date du dernier fraisage. Au total 515 squats de tailles variant de 5 à 160mm, avec un aspect de surface meulé ou non meulé, ont été fraisés au cours de cet essai. La répartition de la population en fonction de leur taille est donnée dans la **Figure 3**.



Figure 3 : Répartition de la population de squats en fonction de leur taille

Retirés de la circulation, ces rails ont permis de reconstituer une voie d'essais de 180m sur lequel un train fraiseur industriel (modèle Schweerbau SF03 **Figure 4**) a effectué cinq passages à moins de 5 km/h. À chaque passage, les fraises, dont l'axe de rotation est parallèle à celui des roues, enlèvent 1,5 mm de matière. Le dernier passage correspond donc à un enlèvement de 7,5 mm de matière par rapport à la surface initiale.

Avant le premier passage, la position et les dimensions longitudinale et transversale de chaque squat ont été mesurées. Puis après chaque passage, la surface des squats a été photographiée et la profondeur de chaque défaut a été mesurée par ultrason. Enfin à la suite de l'essai, la zone a subi un test de ressuage pour identifier d'éventuels réseaux de fissures résiduels.



Figure 4 : Train fraiseur



Figure 5 : Fraisage en laboratoire

B.1.3. Fraisage en laboratoire :

Suite à l'essai avec le train fraiseur, il a été décidé d'effectuer le même type d'essai à une échelle plus en laboratoire pour diverses raisons :

- Réaliser un enlèvement de matière plus réduit à chaque passage de fraise pour permettre une reconstitution plus fine du réseau de fissure dans la profondeur.
- Permettre un fraisage dans l'axe du rail, pour reconstituer le réseau de fissures dans la direction d'avance du train.
- Vérifier la non-influence de l'outil de coupe et de son orientation sur le réseau de fissures observées.

Trois squats développés extraits des sites 1, 4 et 5 ont ainsi été fraisés par passe de 0,5 mm, sur une fraiseuse classique dont l'axe de rotation de l'outil de coupe est parallèle à l'âme du rail. Deux autres squats, provenant des zones 4 et 5, ont été meulés dans la direction de circulation par passe de 1 mm. Après chaque passage de l'outil de coup, la surface mise à jour a été prise en photographie.

B.2. Résultats

B.2.1 aspect de surface / profondeur

L'apparition de fissures résiduelles après chaque passage du train fraiseur permet d'estimer la profondeur approximative des fissures pour chaque squat. Il est alors possible d'établir la relation entre longueur longitudinale de surface et profondeur du réseau de fissures. Deux cas doivent être distingués : les squats meulés et les squats non meulés durant leur vie en voie.

D'un côté si on considère tous les squats, aucune relation linéaire ne semble apparaître entre aspect et surface et profondeur du squat. L'exemple le plus frappant concerne les 6 réseaux de fissures résiduels (soit environ 1% de la population initiale) après le fraisage industriel. Sur ces 6 fissures dont la profondeur dépasse les 7,5mm, les longueurs initiales varient de 10 à 160 mm.

D'autre part, pour le cas des squats non meulés (c'est-à-dire les échantillons provenant uniquement du site 2), une tendance nette apparaît : Plus le squat est imposant en surface, plus le réseau de fissures sous-jacent est profond.

Cette relation comprend trois phases (**Figure 6**) :

1. A partir d'une longueur de 20mm, la fissure atteint rapidement une profondeur de 3 mm.
2. Puis, la profondeur tend à se stabiliser aux alentours de 4mm pour des longueurs comprises entre 20 et 80 mm
3. Enfin la propagation de la fissure reprend et augmente de nouveau de manière significative au-delà d'une longueur de 80mm.

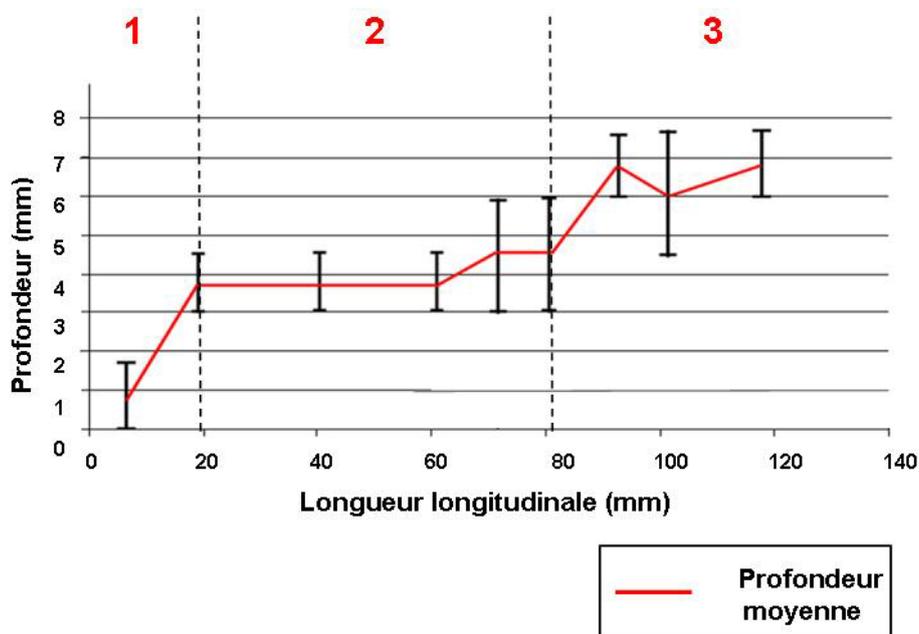


Figure 6 : Relation aspect de surface / profondeur

Cette relation correspond globalement aux trois niveaux de dangerosité des squats définis par l'Union International des Chemins de fers [UIC 02]. La forme générale est également identique aux relations établies pour d'autres types de fissures de fatigue. Grassie inspiré par Glavin [GRA 05] énonce 3 niveaux de développement pour le Head Check (défaut en courbes serrées): Une initiation rapide, une zone de stabilisation et une reprise de la propagation (**Figure 7**).

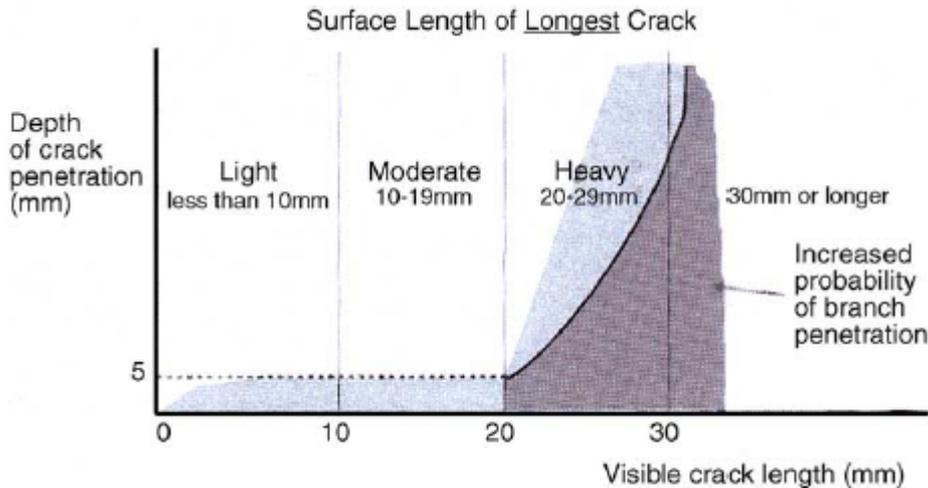


Figure 7 : Corrélation entre longueur en surface et profondeur de pénétration du Head Check [GRA 05]

Remarque : Il semble déconseillé de meuler un squat déjà amorcé, la profondeur à atteindre pour éliminer toutes fissures devient rapidement importante même pour des défauts qui semblent bénins. De plus, en cas d'échec, la propagation en sous-surface est complètement masquée et ne peut plus être suivie visuellement.

B.2.2. Forme 3D du réseau de fissures

Outre la relation entre aspect de surface et profondeur, suivre l'évolution des fissures débouchantes en surface après chaque passage du train fraiseur peut être utilisé comme une « tomographie mécanique » pour étudier les squats très développés (**Figure 8a**). De manière surprenante, le réseau de fissures des 515 squats meulés présente la même forme singulière. Après les deux premiers passages (**Figure 8b** et **8c**), les deux fissures en V sont toujours visibles et rapprochent petit à petit du centre de la bande de roulement. Entre les passages 2 et 3 du train fraiseur, c'est-à-dire entre 3 et 4,5mm sous la surface, l'orientation des fissures changent brutalement (**Figure 8d**) pour s'orienter dans la direction de circulation. Après le 4^{ème} passage (**Figure 8e**), la photographie révèle que la propagation des deux fissures n'est pas symétrique, seule celle parallèle à la direction de circulation est encore visible. On note également qu'entre les passages 3 et 4, la fissure semble s'éloigner du centre de l'ellipse.

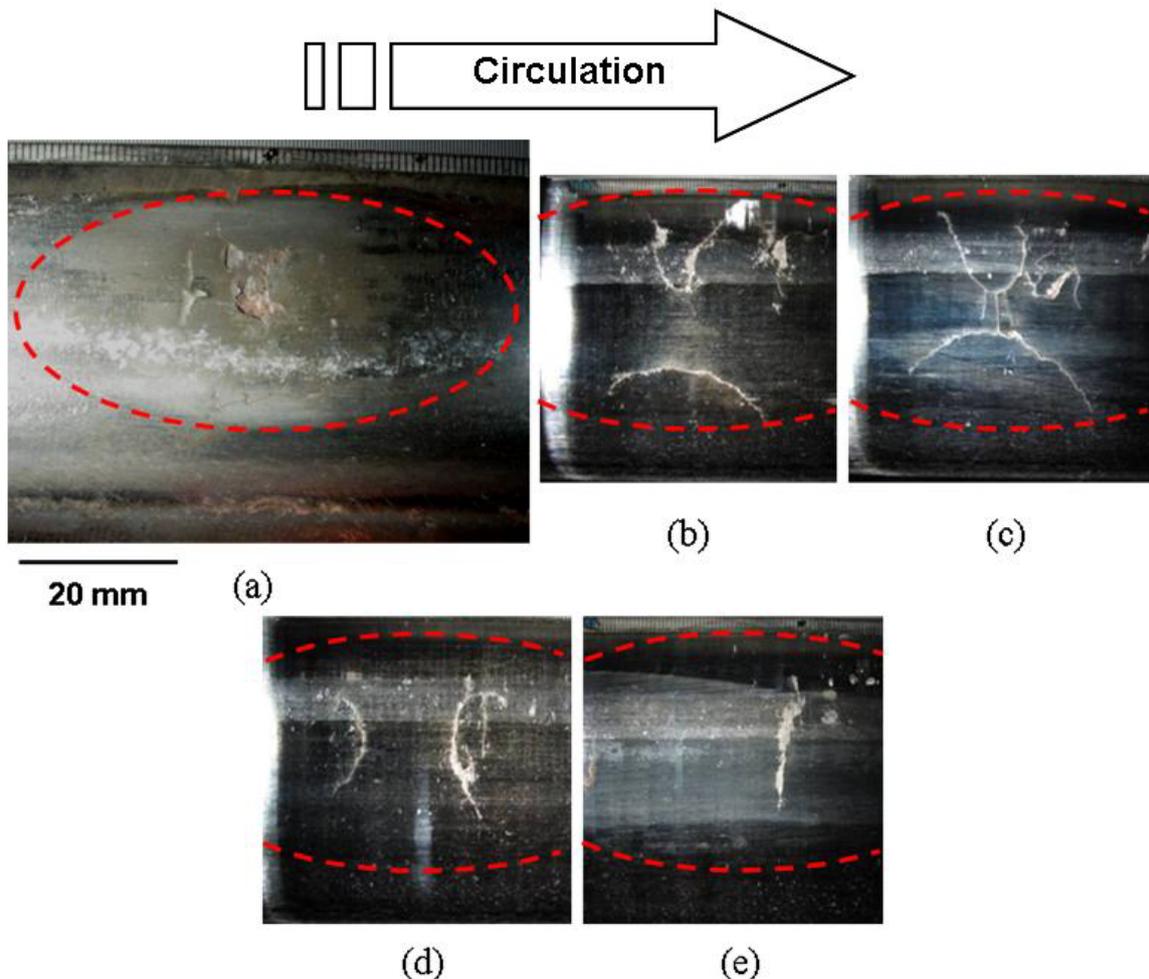


Figure 8 : Fraisage d'un squat dans la profondeur (a) Avant fraisage, (b) Profondeur 1,5mm (c) Profondeur 3mm, (d) Profondeur 4,5mm, (e) Profondeur 6mm

Le meulage plus fin en laboratoire confirme également cette forme générale du réseau de fissures et fournit de nouveaux éléments. La profondeur de passe étant plus fine, on obtient plus de vues de coupes du réseau de fissures. Le degré de finesse obtenu permet de tracer en 3D la forme complète du réseau de fissures (**Figure 9**). Les pointillés bleus représentent les coupes réalisées tous les 1,5mm de profondeur.

La forme générale a donc l'allure d'une selle de cheval, avec deux courbures principales de sens opposés. La courbure principale dans la direction de circulation (axe x) est orientée vers les z négatifs alors que la courbure transversale (axe y) s'oriente vers les z positifs. Ce schéma illustre également la variation d'angle de propagation de la fissure par rapport à la surface et fait écho à la relation établie précédemment (**Figure 6**). Jusqu'au plan d'inversion des fissures, celles-ci plongent avec un angle très faible par rapport à la surface (surface jaune de la **Figure 9**). Après le pont d'inversion, les fissures se propagent dans le rail avec un angle beaucoup plus fort surface (surfaces vertes de la **Figure 9**). Cette forme met en lumière, à la fois la dangerosité et les difficultés du suivi par ultrasons de la profondeur du défaut de squat. Les fissures les plus profondes sont généralement masquées par une fissure supérieure presque parallèle à la surface.

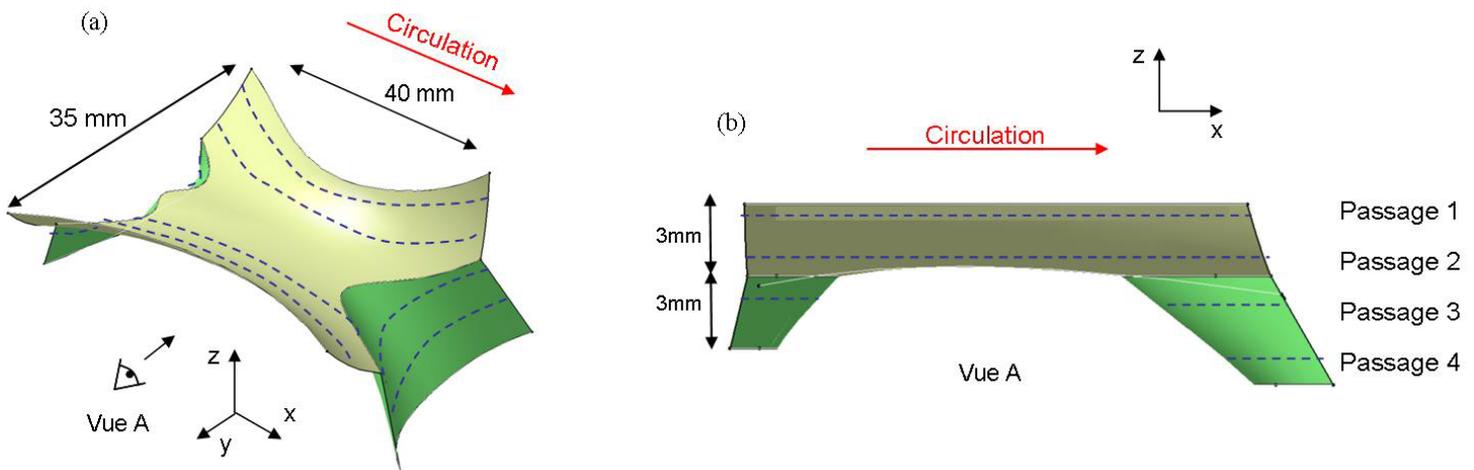


Figure 9 : Forme générale du réseau de fissures (a) Vue isométrique, (b) Vue de côté

Il est intéressant de noter que le point d'inversion des fissures n'est pas systématiquement situé à 3mm sous la surface. En effet, lors du meulage fin du squat issu du site de prélèvement n°1, cette inversion a lieu à 1,5mm sous la surface seulement.

Remarque : Les deux opérations de fraisage aboutissant à une forme identique de réseau de fissures, l'influence de la technique de fraisage employée semble négligeable. Le réseau de fissures observé est bien issu des conditions de contact roue/rail et non pas d'une propagation issue du fraisage.

Cette observation est en parfait accord avec les coupes longitudinales de squats qui peuvent être trouvées dans la bibliographie [UIC 02, CAN 96] et les schémas de propagation classiques de fissures de squats [UIC 02, PAL 13]. Cependant cette vue 3D permet de mieux appréhender le réseau de fissures dans le volume, et notamment, la possibilité de retirer facilement la partie supérieure du squat pour étudier l'aspect de surface au sein des fissures.

Annexe C: Description complète de la bande de roulement Extrait de [DAY10]

Lors d'une première visite sur le site de Bussy-St-Georges (07 mai 2009), des squats à différents stades de développement (naissant, intermédiaire ou avancé : critères de développement selon l'INSA) ont été repérés. Cinq coupons ont été sélectionnés pour prélèvement puis expertise, tous situés voie 2 en file extérieure entre les PK 52766 et 52779 (**Tableau 2**).

Les coupons ont été prélevés (28 mai 2009) et transmis au LaMCoS en « bon état » : les informations tribologiques ont été protégées lors du prélèvement et de l'expédition selon les préconisations du LaMCoS.

Un premier examen des coupons en laboratoire (microscopie optique) a permis d'identifier d'autres défauts à des stades moins avancés que ceux déjà repérés en voie. Les coupons ont donc été re-découpés de façon à isoler chaque défaut répertorié (**Tableau 2** ; **Figure 10**) et à faciliter leur expertise.

Coupons	Échantillons	Stade de développement des défauts
INSA II	II a	Naissant
	II b	Intermédiaire
INSA III	III a	Naissant
	III b	Avancé
	III c	Naissant
INSA IX	IX	Intermédiaire
CORUS I	Corus I	Avancé
CORUS II	Corus II	Intermédiaire

Tableau 2 - Coupons expertisés en laboratoire

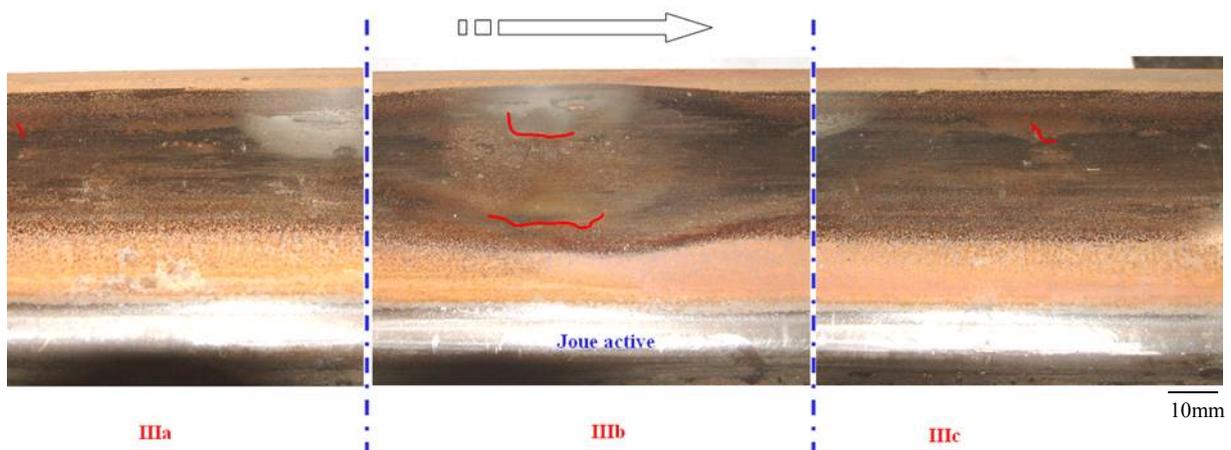


Figure 10- Coupon III

3 défauts répertoriés : IIIa défaut naissant, IIIb défaut avancé, IIIc défaut naissant

L'observation en microscopie électronique à balayage (MEB) des surfaces a été réalisée sur l'ensemble des échantillons.

Les informations tribologiques recueillies étant similaires pour les défauts à des stades de développement équivalents et l'étude s'intéressant aux mécanismes initiaux de formation des squats, un échantillon présentant un défaut naissant a été sélectionné pour réaliser des coupes métallographiques (IIIa).

L'échantillon IIIa présente un front de fissure de quelques mm sur le côté extérieur de la table de roulement. Deux coupes sont réalisées au plus près de la « racine du squat » (**Figure 11**) :

- coupe A-A : la coupe transversale est réalisée en amont du front de fissure,
- coupe B-B : la coupe longitudinale est réalisée à la limite extérieure du front de fissure

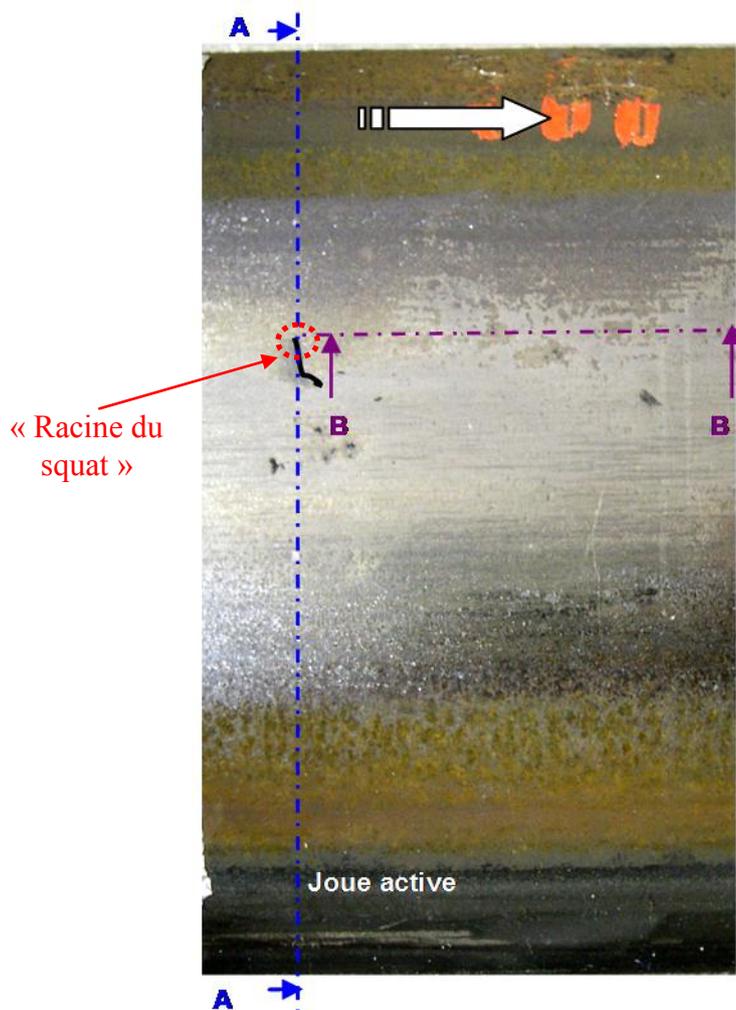


Figure 11 - Localisation des coupes métallographiques

Afin d'illustrer ce rapport, et par souci de clarté et de concision, seules les images les plus représentatives des phénomènes observés sur l'ensemble des échantillons ont été sélectionnées. Afin de faciliter la lecture de ces images, les tendances observées seront synthétisées sous forme de schémas.

Les images correspondent principalement aux échantillons IIa, IIIa, et IIIc (squats naissants).

C.1. Description générale de la table de roulement

Un premier examen macroscopique des coupons prélevés à Bussy-St-Georges permet de définir les caractéristiques générales du rail sur ce site.

C.1.1. Bandes de contact

La table de roulement s'organise en bandes de contact présentant des morphologies de surface distinctes (Figure 12). Les bandes de contact seront indicées de I à V.

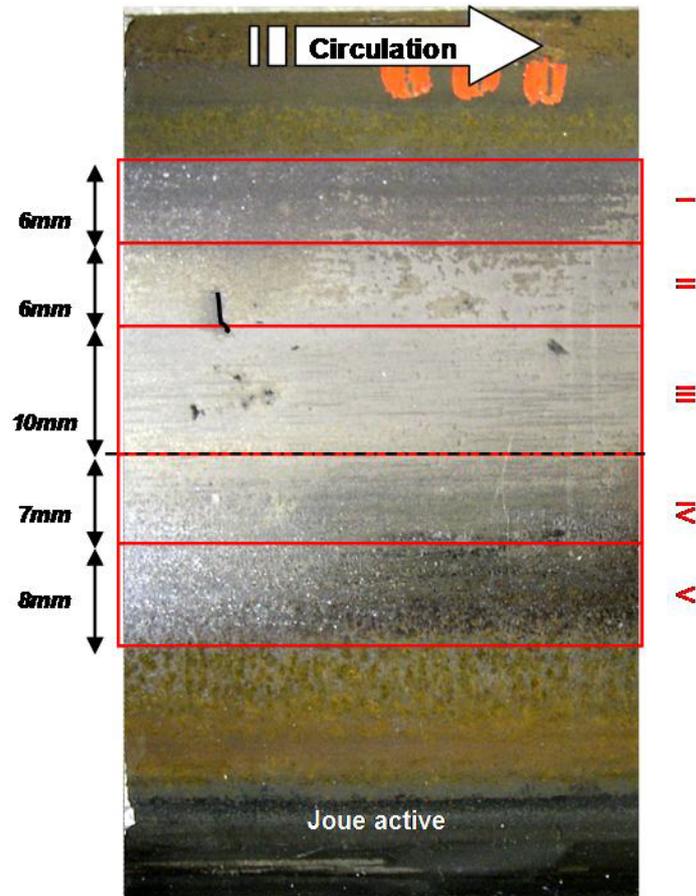


Figure 12 - Description macroscopique de la table de roulement IIIa – Bandes de contact

C.1.2. Phénomènes périodiques

Les observations macroscopiques de la table de roulement mettent en évidence un motif périodique longitudinal (~ 4 cm) (Figure 13) :

- des élargissements ponctuels de la bande de roulement sont régulièrement observés en bande I,
- deux morphologies de surface s'alternent longitudinalement en bande II (II_1 – bande oxydée ; II_2 – bande brillante).

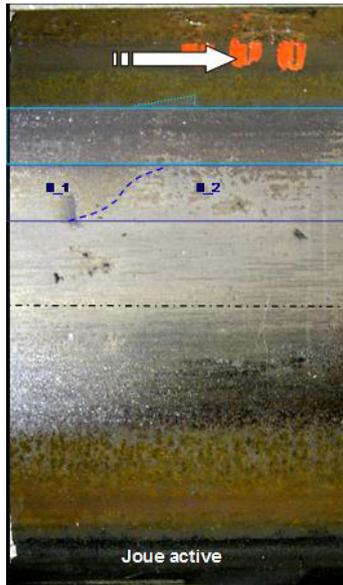


Figure 13 – Motif périodique de la bande de roulement IIa
Bande I – Elargissement localisé de la bande de roulement (-----)
Bande II – 2 Morphologies de surface alternées (-----)

Les relevés de profils semblent également confirmer un phénomène périodique vertical (légère ondulation) (**Figure 14**) :

- * la période d'ondulation est de l'ordre de 4cm, et est en phase avec la localisation des squats,
- * l'amplitude des ondulations « présumées » pour les défauts naissants est de l'ordre de 50 μ m.

La faible amplitude de cette ondulation est à relativiser au vu de la pertinence des mesures effectuées jusqu'à présent ainsi que de la difficulté de reconstruction du défaut de surface. Les relevés de profils ont été réalisés sur des échantillons d'environ 100mm de longueur et de 10mm d'épaisseur. Il serait intéressant de réaliser des profils couvrant plusieurs périodes consécutives (échantillon > 30cm) et ainsi de s'affranchir des effets de bord (influence des découpes, redressement des profils etc.).

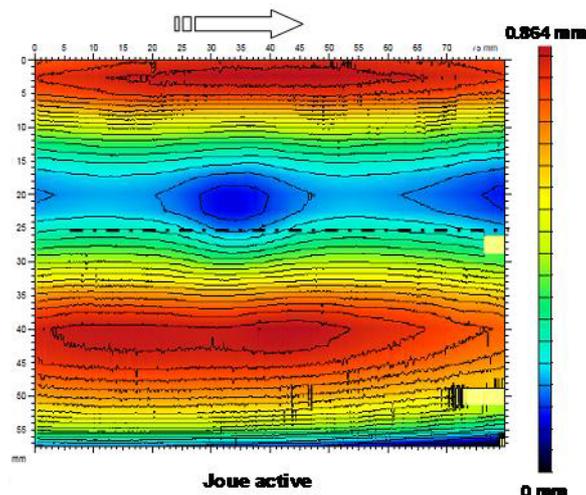


Figure 14 – Relevés de profil – Reconstruction du défaut de surface, Ecart au profil- Echantillon IIb

Enfin, à ce stade de la compréhension des mécanismes de formation des squats, il est difficile de classer ce(s) phénomène(s) périodique(s) dans la liste des causes ou des conséquences des squats.

C.1.3. Description locale de la table de roulement

Après l'examen macroscopique des échantillons, les expertises tribologiques se sont attachées à décrire, plus localement, la morphologie de surface et les modifications microstructurales intervenants dans les cinq bandes de contact précédemment décrites. Ces observations permettront de mieux comprendre les conditions de contact et les réponses tribologiques locales conduisant à la formation des squats.

C.1.3.1. Bande I (JNA - 6mm)

* Morphologie de surface :

La surface est recouverte d'une couche dense de résidus oxydés, provenant de la « calamine » initialement présente à la surface du rail (**Figure 15**). Les sollicitations tribologiques, peu intenses dans cette bande, sont accommodées par cette couche de « calamine », qui est écrouie, cisailée et progressivement évacuée (mécanisme illustré par la présence de plaques d'oxyde).

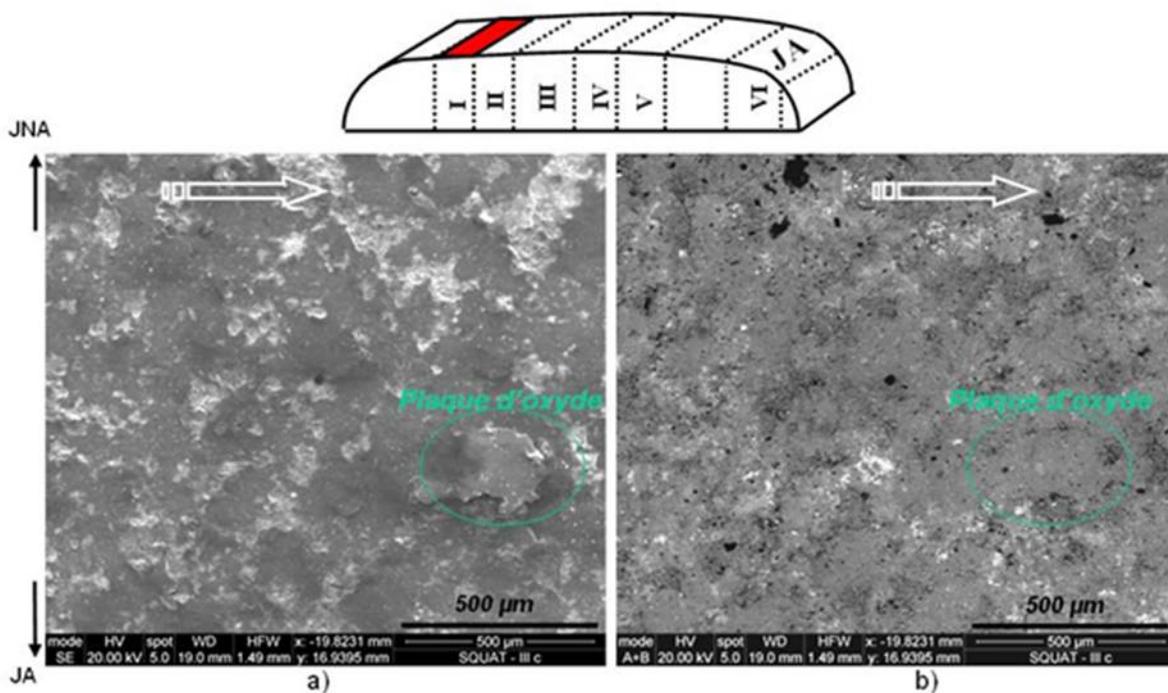


Figure 15 - Bande I - Morphologie de surface

Image MEB par électrons secondaires (SE) ; b) Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE)

NB : Les deux images de la figure 9 correspondent à deux « prises de vue » de la même zone réalisées selon deux modes de détection d'électrons différents.

De façon schématique, les analyses SE (électrons secondaires) permettent principalement de visualiser la topographie de surface, alors que les analyses BSE (électrons rétrodiffusés) permettent de distinguer les éléments ou les phases suivant leur numéro atomique : Z élevé en blanc (Fe de l'acier) et Z faible en noir (Oxydes).

* Microstructure :

La microstructure n'est pas significativement déformée ou transformée dans cette bande par rapport à la microstructure initiale du rail. La coupe A-A confirme la présence de résidus oxydés, piégés dans les rugosités de surface (**Figure 16**).

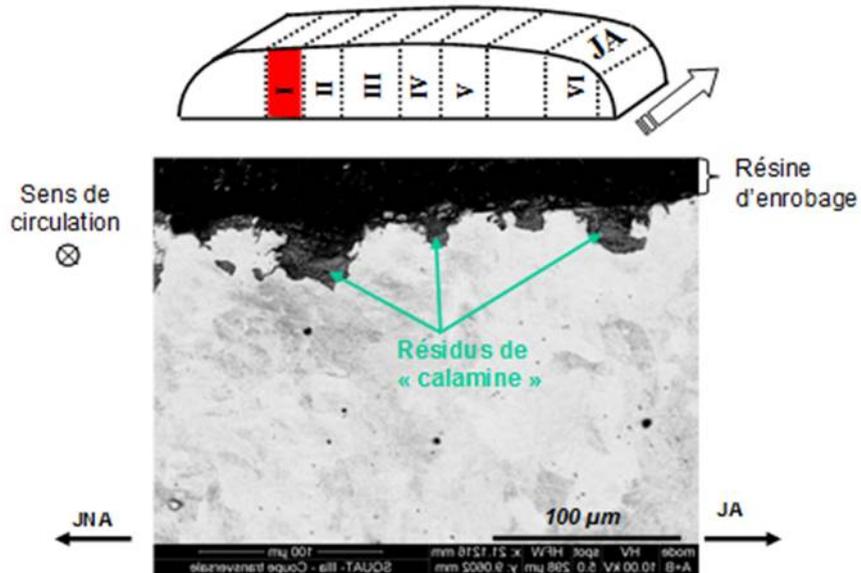


Figure 16 - Bande I – Microstructure – Coupe A-A
Image MEB par électrons secondaires (SE)

C.1.3.2. Bande II (6mm)

La bande II est caractérisée par deux morphologies de surface qui s'alternent longitudinalement (**Figure 17**).

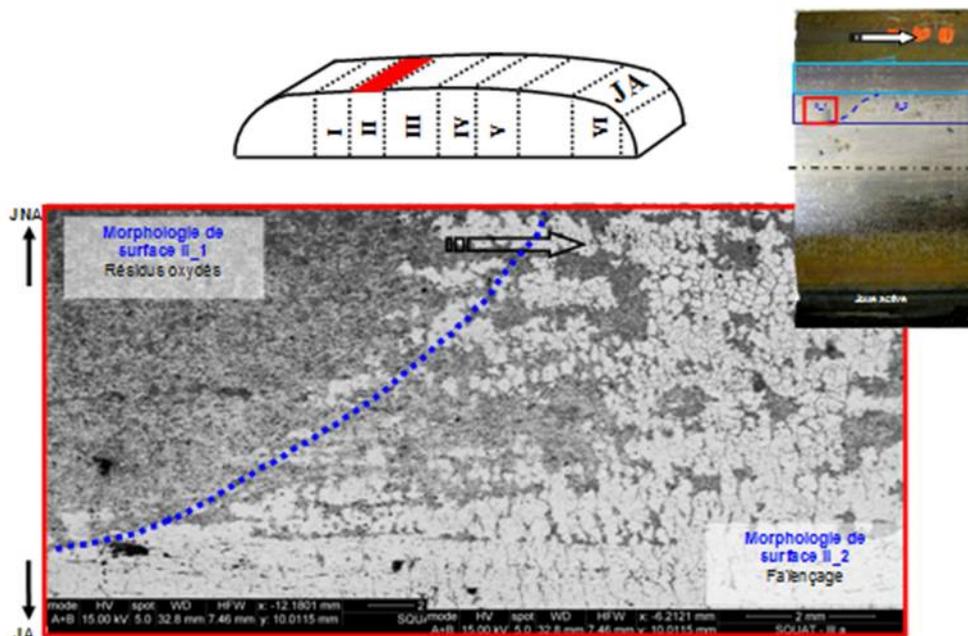


Figure 17 - Bande II – Deux Morphologies de surface
Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE)

* Morphologie 1 - Résidus oxydés :

Comme pour la bande I, la surface de la bande II_1 est recouverte de résidus oxydés mais cette fois en moins grande quantité. Les zones sombres de la **Figure 18b** correspondent à l'« ultime » couche de résidus de « calamine » présente en surface, tandis que les zones claires correspondent au rail « massif » progressivement mis à jour par l'élimination de cette couche « ultime » de calamine.

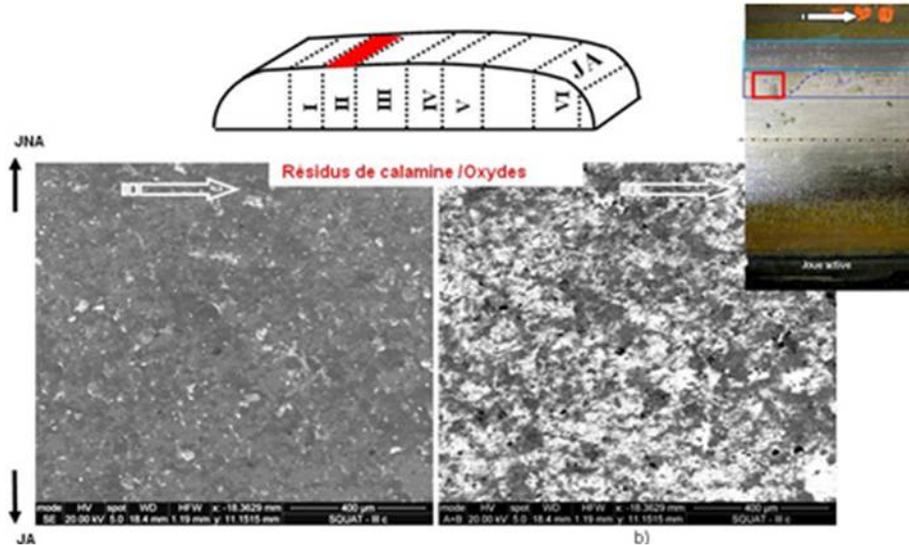


Figure 18 - Bande II_1 ; Morphologie de surface

a) Image MEB par électrons secondaires (SE) ; b) Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE)

* Morphologie 2 – Faïençage :

La surface de la bande II_2 est lisse et présente un important réseau de fissures (**Figure 19**). Le terme de faïençage (type 1) sera utilisé par la suite. Ce faïençage présente un motif régulier sous forme de plots / îlots de $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ qui peuvent, dans un premier, temps être assimilés à des « écailles ». Ce dernier terme sera utilisé par la suite. Ces écailles peuvent se détacher, laissant apparaître des zones rugueuses et oxydées. Il y a peu de 3^{ème} corps dans la bande II_2, il comble le réseau de fissures ainsi que les vides laissés par les écailles détachées.

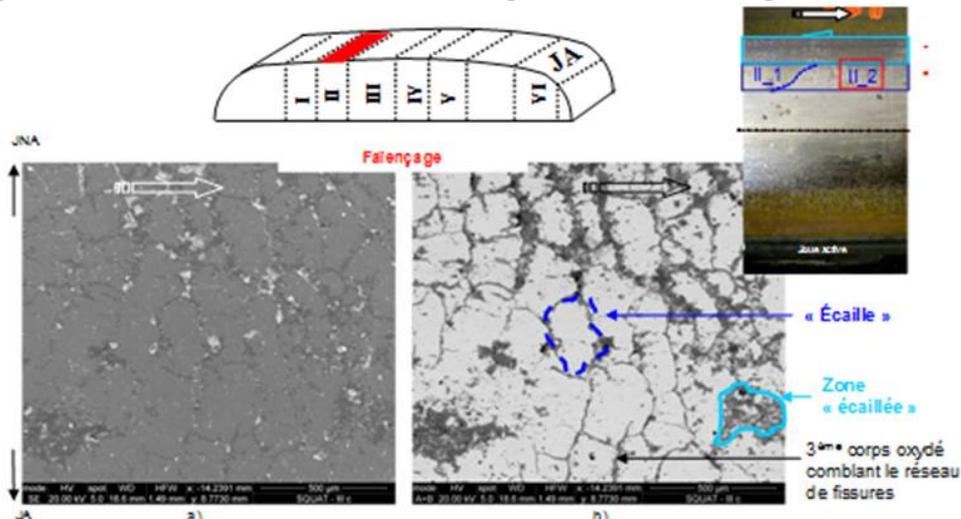


Figure 19 - Bande II_2 ; Morphologie de surface

a) Image MEB par électrons secondaires (SE) ; b) Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE)

Deux coupes sont réalisées sur l'échantillon IIIa à la « racine de la fissure » (**Figure 20**). La coupe A-A (coupe transversale) « intersecte » la bande II dans une région présentant une morphologie de surface de type 1. La coupe B-B (coupe longitudinale) est réalisée dans la bande II et montre une variation importante de la microstructure le long du profil. Cette coupe va être corrélée aux observations réalisées en surface.

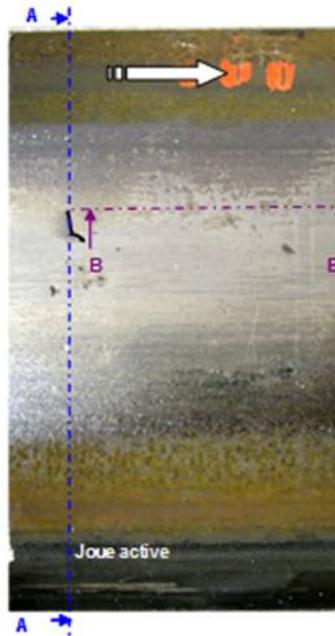
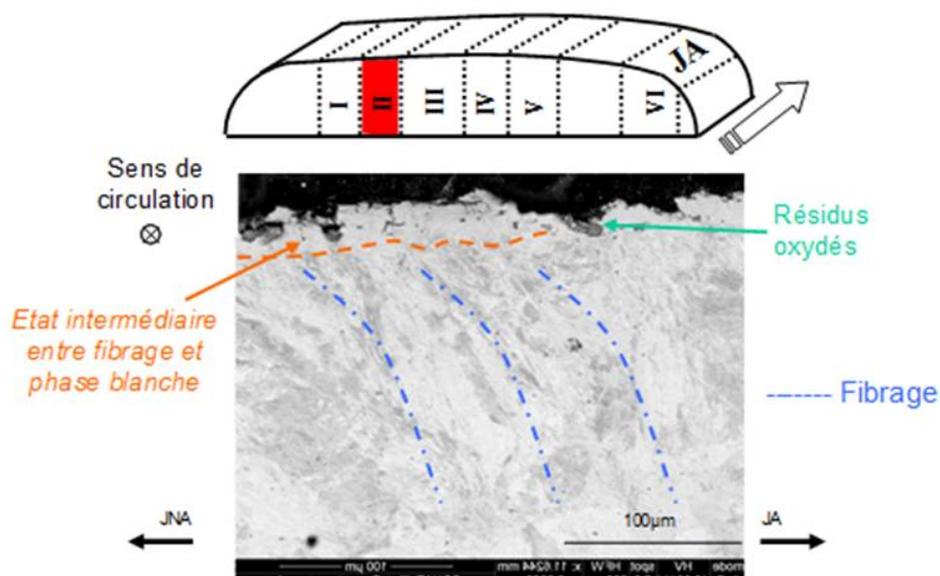


Figure 20 - Localisation des coupes métallographiques

* Microstructure 1 – Expertise de la coupe A-A et B-B (**Figure 20**) :

Les régions présentant une morphologie de surface de type II_1 sont caractérisées par une microstructure peu déformée ou transformée par rapport à la microstructure initiale du rail. La topographie de surface est assez irrégulière et des résidus d'oxyde sont piégés dans les rugosités de surface. Un léger fibrage est identifié, et présente deux composantes. La composante transversale est orientée vers la joue non active (**Figure 21**).



**Figure 21 - Bande II_1 – Microstructure – Coupe A-A
Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE)**

La composante longitudinale est orientée dans le sens de la circulation (**Figure 22**). Localement des décohésions du fibrage sont observées.

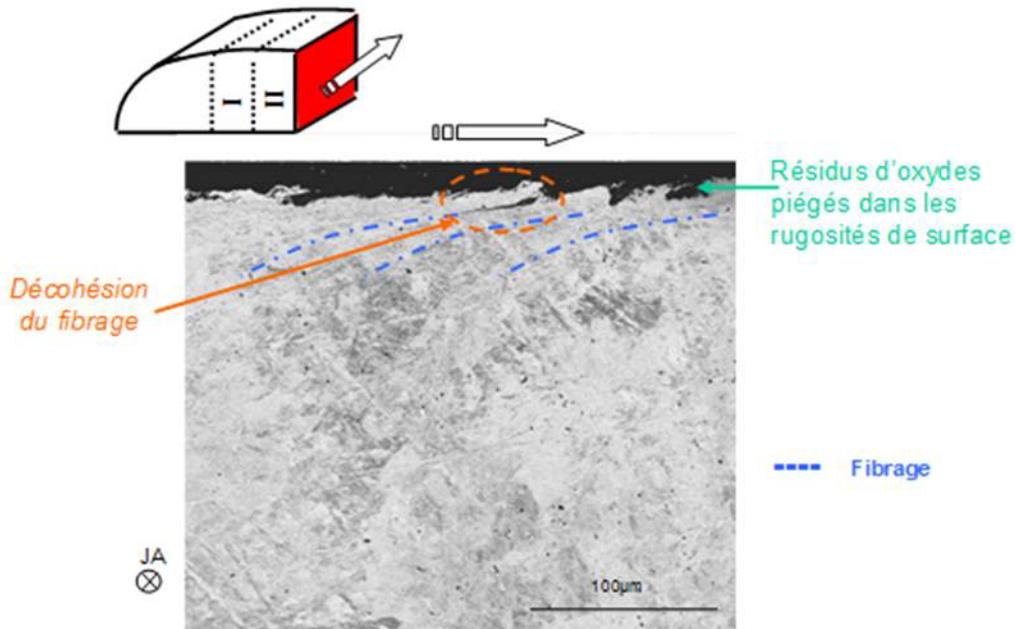


Figure 22 - Bande II_1 – Microstructure – Coupe B-B
Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE)

* Microstructure 2 - Faïencage - Expertise des coupes A-A et B-B (Figure 20)

L'étude des coupes A-A et B-B montre que les régions faïencées sont caractérisées par la présence quasi continue de phase blanche présentant une forte densité de microfissures (**Figure 23**, **Figure 24**).

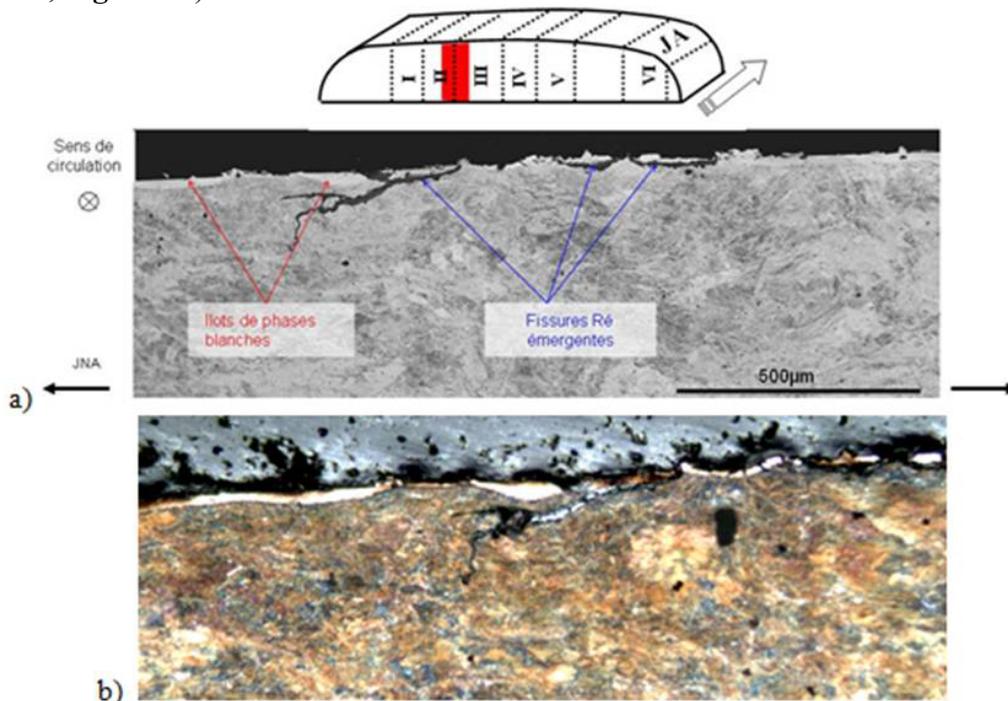


Figure 23 - Bande II_2 ; Microstructure – Coupe A-A
a) Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE) ; b) image en optique

Les phases blanches s'organisent en couches d'épaisseur non uniforme ($<25\mu\text{m}$), évoquant une juxtaposition d'îlots de phase blanche.

Il faut distinguer les microfissures (profondeur $<50\mu\text{m}$) des fissures plus profondes qui pourraient initialiser le développement d'un squat (défaut macroscopique). Les microfissures, naissent dans/ou à l'interface de deux îlots de phase blanche, et se propagent en sous surface. La microstructure sous-jacente et l'orientation du fibrage (bien que peu prononcé dans le cas présent) jouent certainement un rôle important dans la propagation de microfissures.

Les ouvertures des fissures, très larges, sont intégralement comblées d'oxyde, ce qui est cohérent avec les observations de surface. Cela peut également correspondre à un artefact de coupe, de polissage ou d'attaque. Cette indétermination ne peut être levée dans le temps imparti à cette expertise.

Dans le plan transversal, les microfissures n'ont pas d'orientation privilégiée vers la joue active ou la joue non active. Certaines semblent ré-émerger en surface, d'autres se rejoignent, dessinant des cuvettes de $100\mu\text{m}$ de largeur pour moins de $50\mu\text{m}$ de profondeur (**Figure 23**). Cette description est cohérente avec les observations réalisées en surface.

Dans le plan longitudinal, les fissures apparaissent tous les $100\mu\text{m}$ approximativement. Cela correspond au motif de faïencage précédemment décrit. Les fissures se propagent dans le sens opposé à la circulation. Elles se développent normalement à la surface dans couche de phase blanche, puis s'inclinent progressivement en sous surface pour atteindre 50 à $100\mu\text{m}$ de profondeur (**Figure 24**).

Les fissures les moins profondes tendent à devenir parallèles à la surface et peuvent ainsi participer à l'élimination de la couche de phase blanche : compétition entre formation des fissures et élimination de la phase blanche. Les fissures qui atteignent $100\mu\text{m}$ de profondeur se propagent, quant à elles, à environ 30 degrés par rapport à la surface et ne participent *a priori* pas à l'évacuation de la phase blanche.

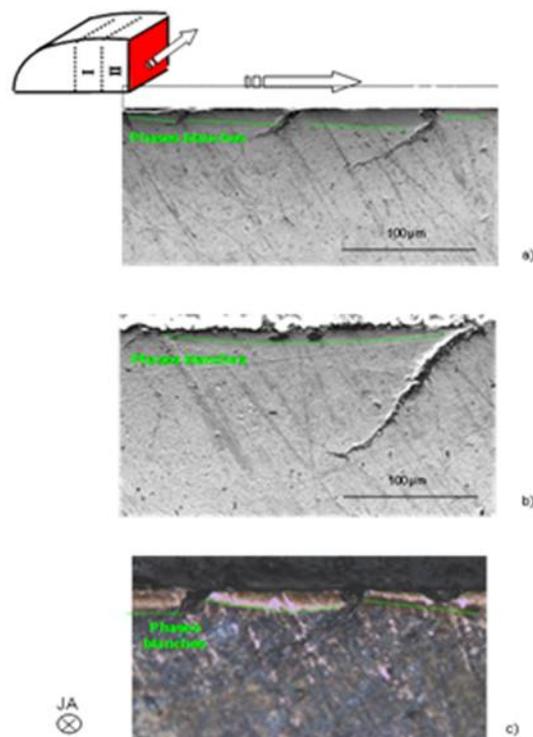


Figure 24 - Bande II_2 ; Microstructure – Coupe B-B
a) et, b) Images MEB par électrons secondaires (SE), c) Image en optique

* Microstructure à l'endroit du front fissure principal (étude des coupes Figure 20) :

Comme introduit précédemment les premiers fronts de fissure « macroscopiques » apparaissent à l'interface entre les bandes II et III.

La coupe A-A (**Figure 11**) réalisée en amont du défaut ne permet pas de visualiser l'amorce de la fissure repérée sur l'échantillon IIIa. Sur la coupe B-B (**Figure 11**), la fissure est nettement visible. Elle se propage dans le sens opposé à la circulation, et atteint 500 μm de profondeur. La fissure se développe normalement à la surface sur 150 à 200 μm , puis se réoriente pour former un angle de 30° environ avec la surface. (**Figure 25**)

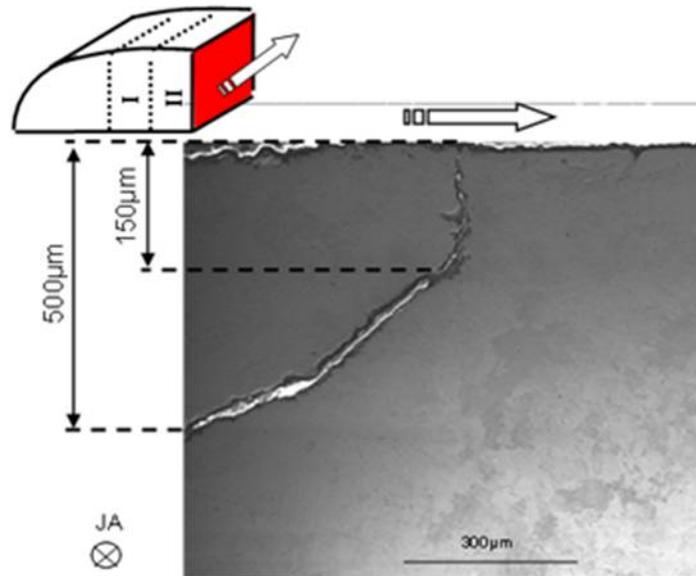


Figure 25 - Bande II_2 ; Fissure principale– Coupe B-B
Image MEB par électrons secondaires (SE)

La coupe A-A montre l'apparition d'une composante transversale du fibrage à l'interface des bandes II et III.

La coupe B-B ne permet pas de mettre en évidence une phase blanche ou une composante longitudinale du fibrage. Néanmoins, le positionnement de la coupe ne pouvant être précis au 0.1mm près, rien n'exclu que de tels phénomènes n'interviennent pas dans le mécanisme d'initialisation de la fissure.

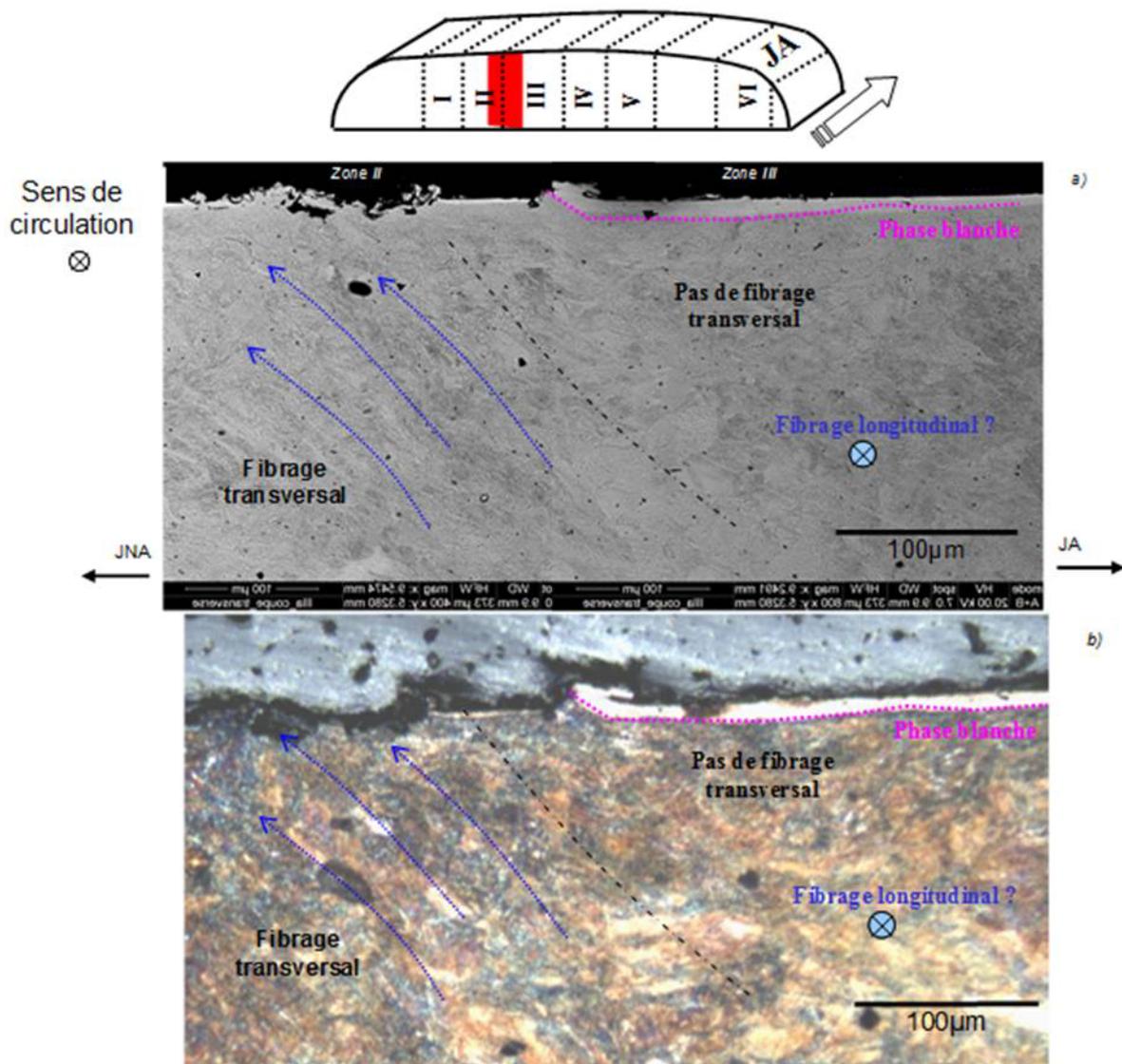


Figure 26 - Bande II_2 ; Microstructure – Coupe A-A ; Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE)

L'étude de la coupe B-B montre toutefois la présence de phase blanche à environ 2 mm en aval du front de fissure. Cette phase blanche semble être associée (cause ou conséquence ?) à un fibrage important en proche surface, orienté dans le sens inverse de la circulation. Il y a donc inversion locale du fibrage par rapport à celui décrit pour la bande II_1. Ce fibrage intervient sur une très faible épaisseur, illustrant un important cisaillement de la matière. La matière semble s'enrouler autour d'îlots de phase blanche. Cela pourrait expliquer la croissance des phases blanches en îlot.

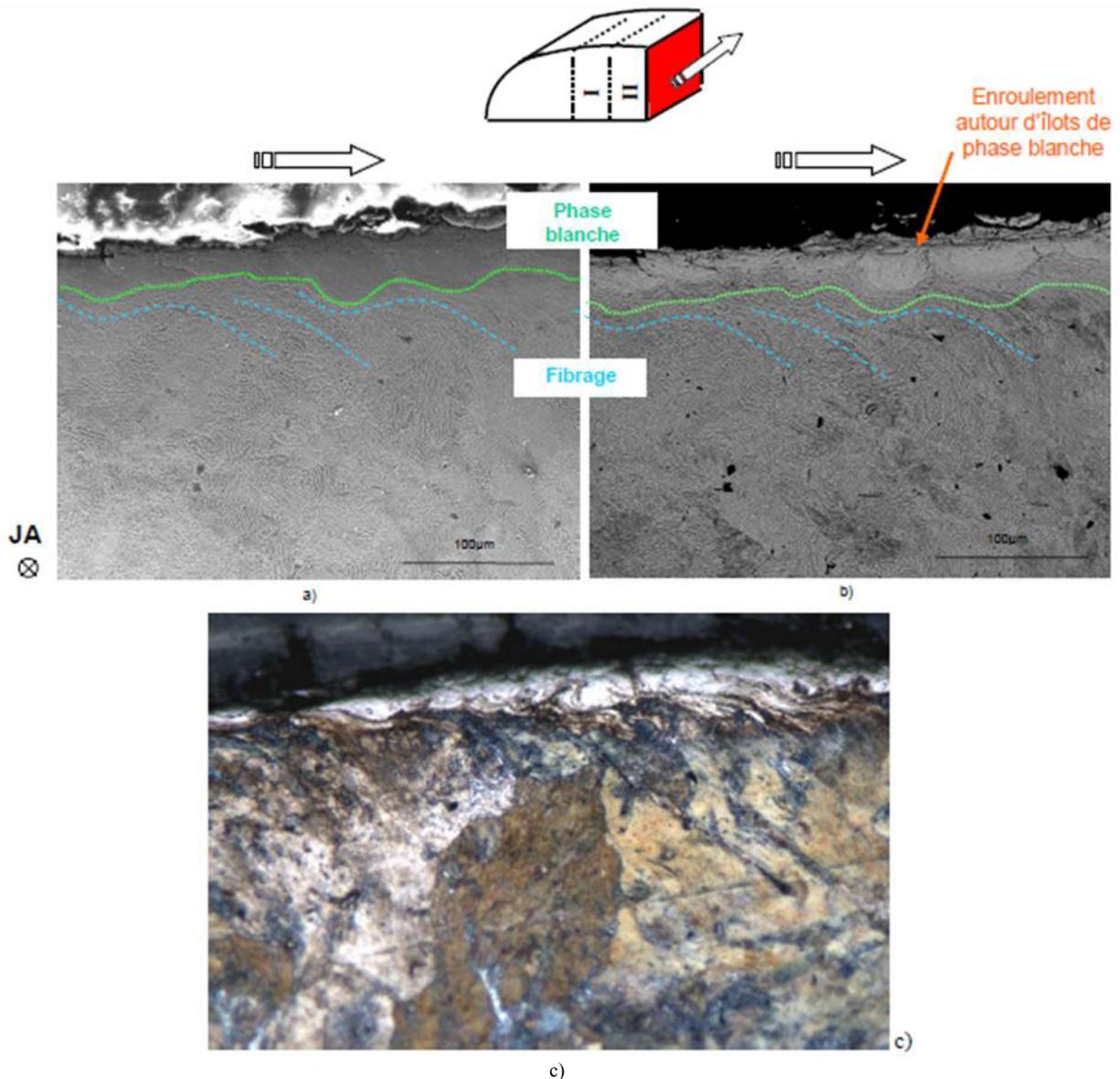


Figure 27 - Bande II_2 ; Microstructure – Coupe B-B ; Inversion fibrage

a) Image MEB par électrons secondaires (SE) ; b) Images en Z contraste ; c) Image en optique

C.1.3.3. Bande III (10mm)

* Morphologie de surface :

En bande III, la surface est lisse et présente un important réseau de faïençage (**Figure 28**). Contrairement à la bande II, les fissures s'organisent perpendiculairement à l'axe du rail, sur plusieurs mm de largeur et se répètent avec un intervalle compris entre 500µm et 1mm. Ce motif est visible à l'œil nu et sera appelé faïençage type 2.

Il y a peu de 3^{ème} corps dans cette bande. Des bandes oxydées sont cependant discernables. Elles correspondent à des régions affectées par du détachement de particules. Ce détachement crée du 3^{ème} corps (oxydable) et une topographie susceptible de le piéger.

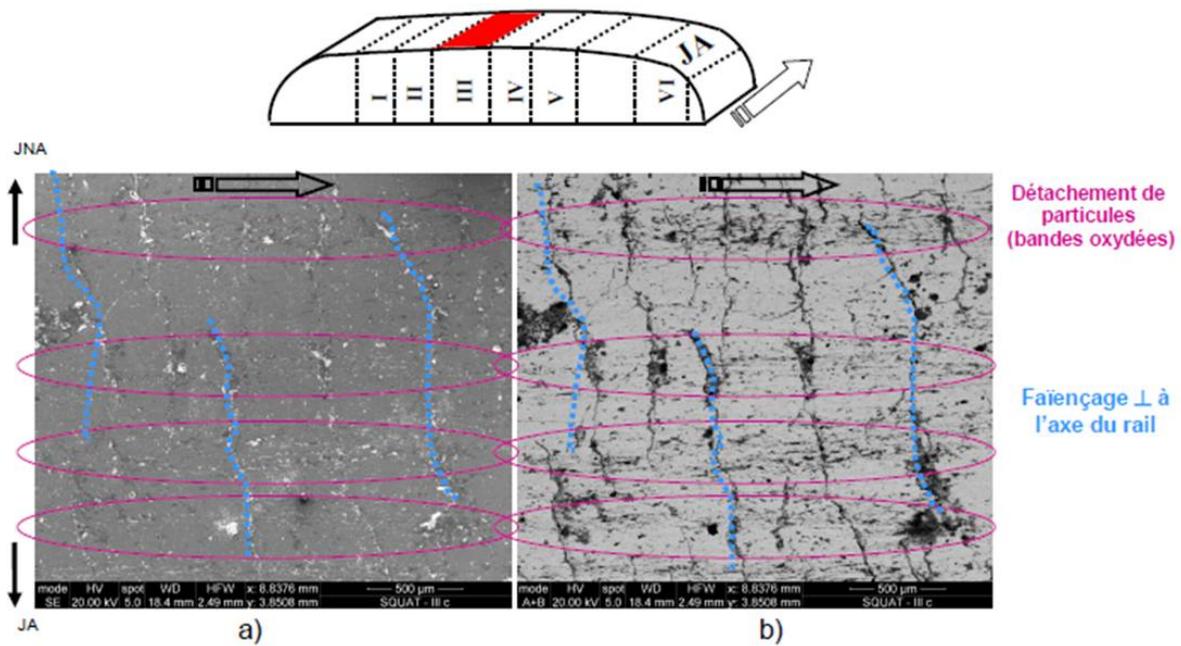


Figure 28 - Bande III ; Morphologie de surface

a) Image MEB par électrons secondaires (SE) , B) Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE)

* Microstructure (Expertise coupe A-A , Figure 20) :

L'étude de la coupe A-A montre que la bande III est caractérisée par la présence quasi continue de phase blanche, s'organisant en une couche homogène, d'épaisseur uniforme (~25μm).

La microstructure sous-jacente semble écrouie mais ne présente pas de fibrage transversal. Cependant, un fibrage longitudinal n'est pas à exclure. Au centre de la bande III, quelques fissures de 200μm de largeur sont repérées à 100μm en dessous de la surface. Cette organisation est cohérente avec la description du faiçonnage développée dans le paragraphe précédent. (Figure 29)

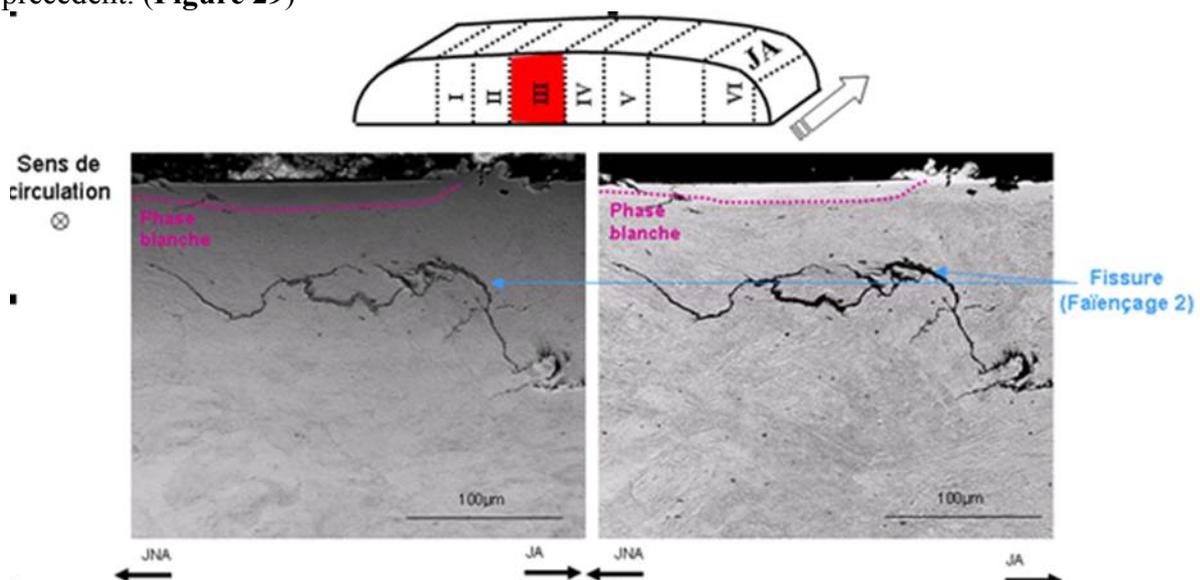


Figure 29 - Bande III ; Microstructure – Coupe A-A

a) Image MEB par électrons secondaires (SE) , b) Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE)

C.1.3.4. Bande IV (7mm)

* Morphologie de surface :

La description de la surface dans la bande IV est très similaire à celle de la bande II_2. En effet, la surface présente un important réseau de fissures ou faïençage (**Figure 30**). Le faïençage présente un motif régulier rappelant des écailles (100µm par 100µm). Ces « écailles » semblent néanmoins se détacher plus facilement que dans la bande II_2. Il y a également plus de 3^{ème} corps que dans la bande II_2.

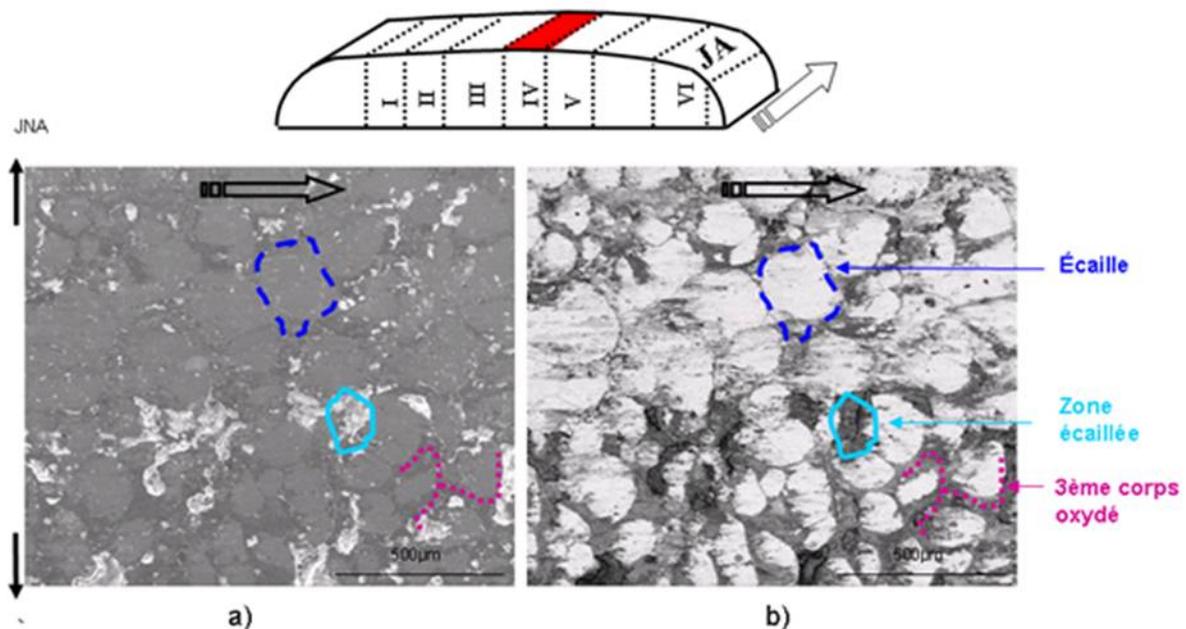


Figure 30 - Bande IV ; Morphologie de surface

a) Image MEB par électrons secondaires (SE) , b) Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE)

* Microstructure (Expertise coupe A-A) :

La description de la microstructure est similaire à celle de la bande II_2. On retrouve une couche discontinue de phase blanche et des fissures. Le fibrage transversal est cependant plus prononcé que dans la bande II et met en évidence des sollicitations transversales (**Figure 31**).

Les fissures les moins profondes se propagent en sous surface et dessinent des cuvettes de 100µm de largeur pour 50µm de profondeur (**Figure 31 a**). D'autres fissures se propagent le long d'une microstructure fibrée et atteignent jusqu'à 200µm de profondeur (**Figure 31 b**).

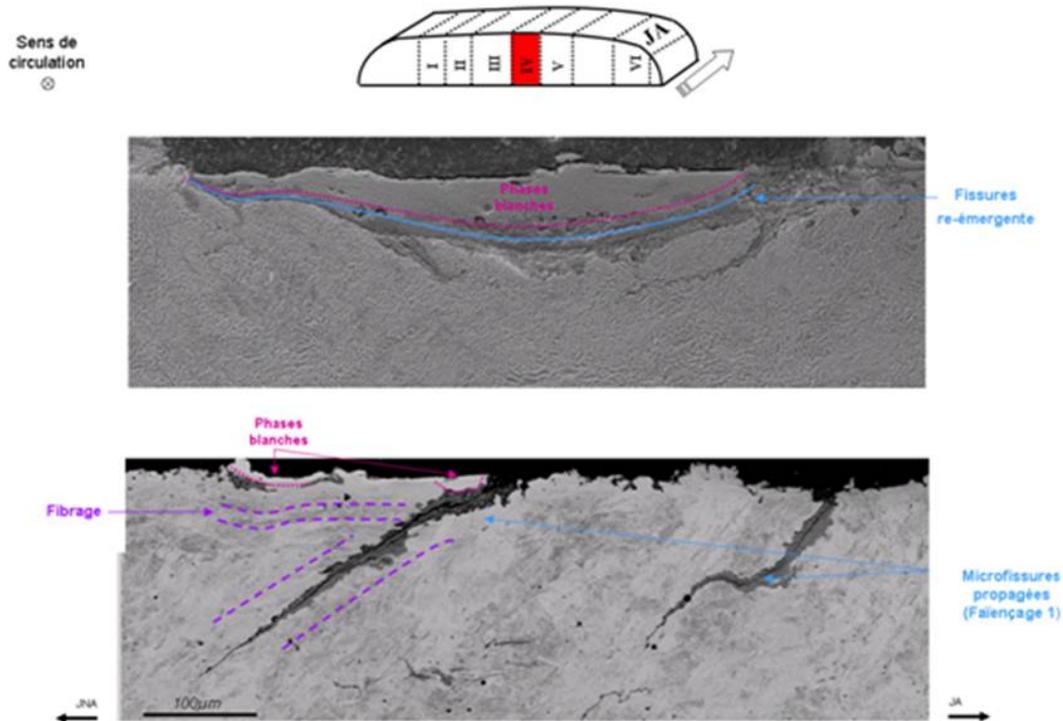


Figure 31 - Bande IV ; Microstructure

a) Image MEB par électrons secondaires (SE) ; b) Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE)

C.1.3.5. Bande V (JNA - 8mm)

La description de cette bande est similaire à celle de la bande I

* Morphologie de surface :

La surface est recouverte d'une couche dense de résidus oxydés, provenant de la calamine initialement présente à la surface du rail. (Figure 32)

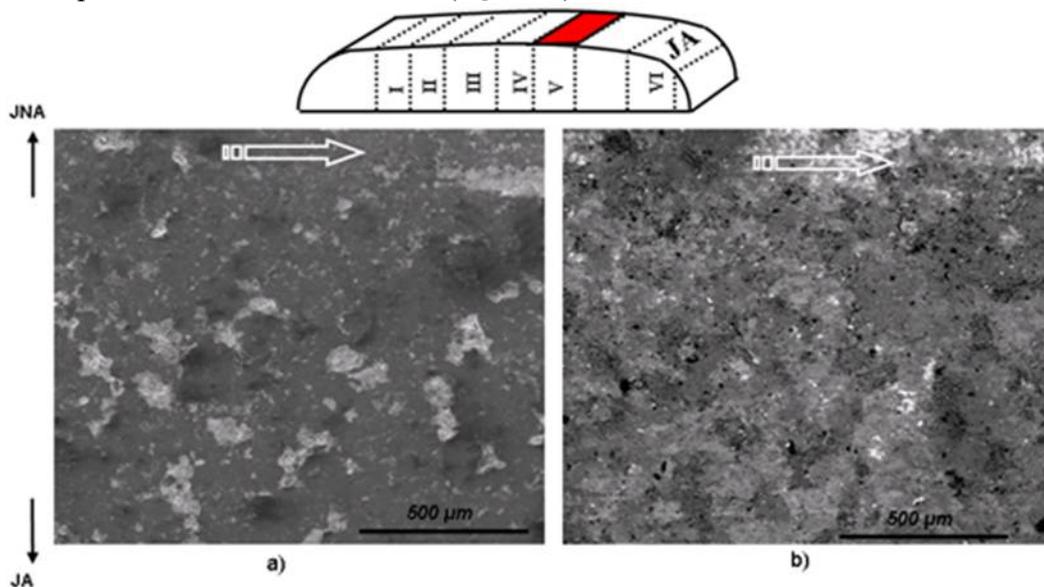


Figure 32 - Bande V ; Morphologie de surface
Images MEB par électrons secondaires (SE)

* Microstructure :

La microstructure n'est pas significativement déformée ou transformée. La coupe A-A confirme la présence de résidus oxydés, piégés dans les rugosités de surface. (Figure 33)

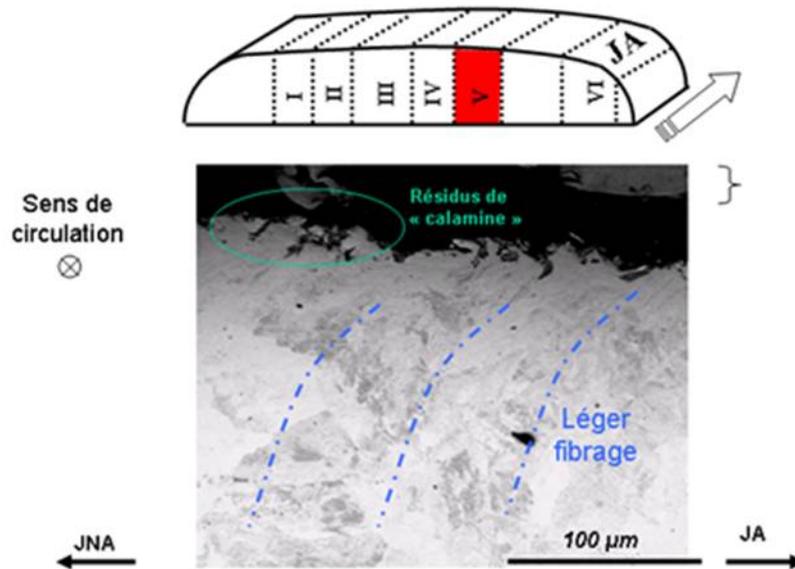


Figure 33 - Bande IV ; Microstructure
Image MEB par électrons rétrodiffusés (BSE)

Annexe D : Validation des mesures IRR

D.1. Validation des mesures des efforts verticaux Q

La validation de la valeur moyenne des efforts Q est relativement aisée à effectuer en travaillant sur les sommes des efforts verticaux vus par un essieu ou un bogie (**Figure 34**). Dans les 3 cas de charges simulés durant l'essai (0, 3 et 6 personnes / m²), on vérifie que la somme des efforts verticaux sur le bogie 3 au cours de la marche oscille autour de la moitié du poids de la voiture considérée.

L'écart maximum constaté d'environ 6% avec la valeur théorique s'explique par des phénomènes de transferts de charges entre les bogies avant et arrière de la voiture. Ces phénomènes sont principalement provoqués soit par une déclivité non nulle de la voie (comme entre les repères 1 et 2), soit par une accélération ou un freinage important. Ainsi, à partir du repère 3, le freinage opéré lors des 3 marches entraîne une surcharge dynamique sur le bogie 3 situé en tête de voiture.

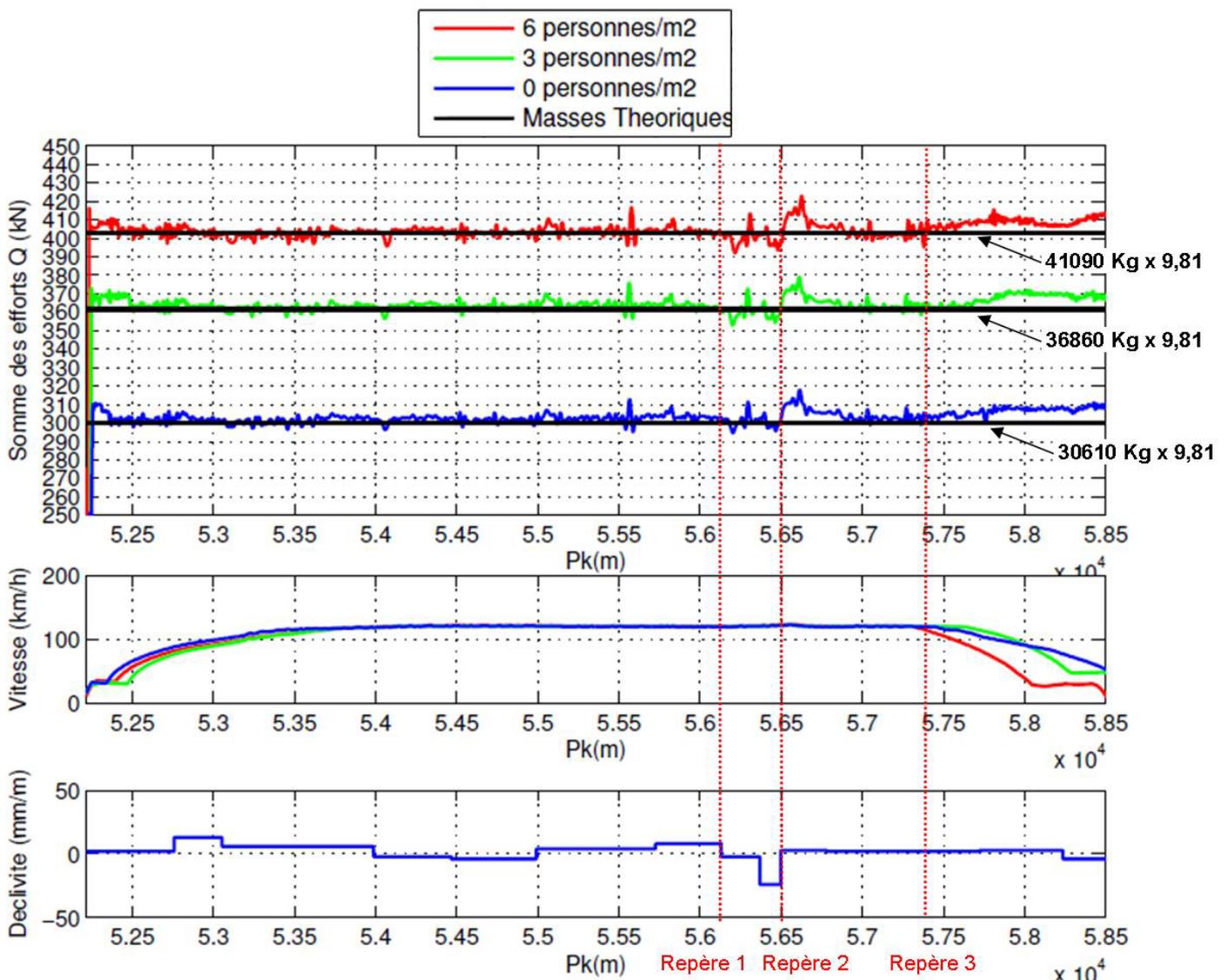


Figure 34 : Somme des efforts verticaux vus par le bogie 3 par rapport à la pesée théorique pour les 3 cas de charge testés dans l'essai (Circulation vers les PK croissants)

D'autres éléments de validation apportent un fort degré de confiance sur la mesure des efforts Q . Par exemple, la répartition des efforts verticaux sur le premier essieu en fonction de la courbe de vitesse du train et la courbure horizontale de la voie (**Figure 35**) traduit un comportement cohérent du train vis-à-vis de la dynamique ferroviaire, notamment en terme de roulis de caisse :

- Avant le repère 1, le train parcourt un alignement, les efforts sont globalement identiques entre les roues droite et gauche de l'essieu.
- Entre le repère 1 et 2, le train circule dans une courbe orientée à gauche avec une vitesse supérieure à 80 km/h. Or, en courbe, la file extérieure du rail est légèrement surélevée pour compenser l'effort centrifuge qui s'exerce sur le véhicule, on parle de dévers. Ce dévers est calculé pour compenser parfaitement l'effort centrifuge pour une vitesse de 80 km/h. Avec une vitesse supérieure, le train circule donc en insuffisance de dévers et la caisse subit un effort centrifuge qui l'attire vers la file extérieure, l'effort normal sur la roue droite augmente.
- Le transfert de charge droite-gauche à la transition entre excès de dévers et insuffisance de dévers se lit de manière encore plus visible au niveau des repères 3 et 5. Avant le repère 3, l'effort centrifuge semble bien compensé. Puis à partir des 80 km/h, l'effort sur la roue gauche augmente du fait de la courbe à droite. De la même manière au niveau du repère 5, on note une très nette inversion des efforts dus au plus faible rayon de courbure de la voie.
- Le repère 4 (comme le repère 2) montre que le déséquilibre d'efforts Q se résorbe petit à petit après le virage. Après environ 150m, on retrouve le déséquilibre initial.

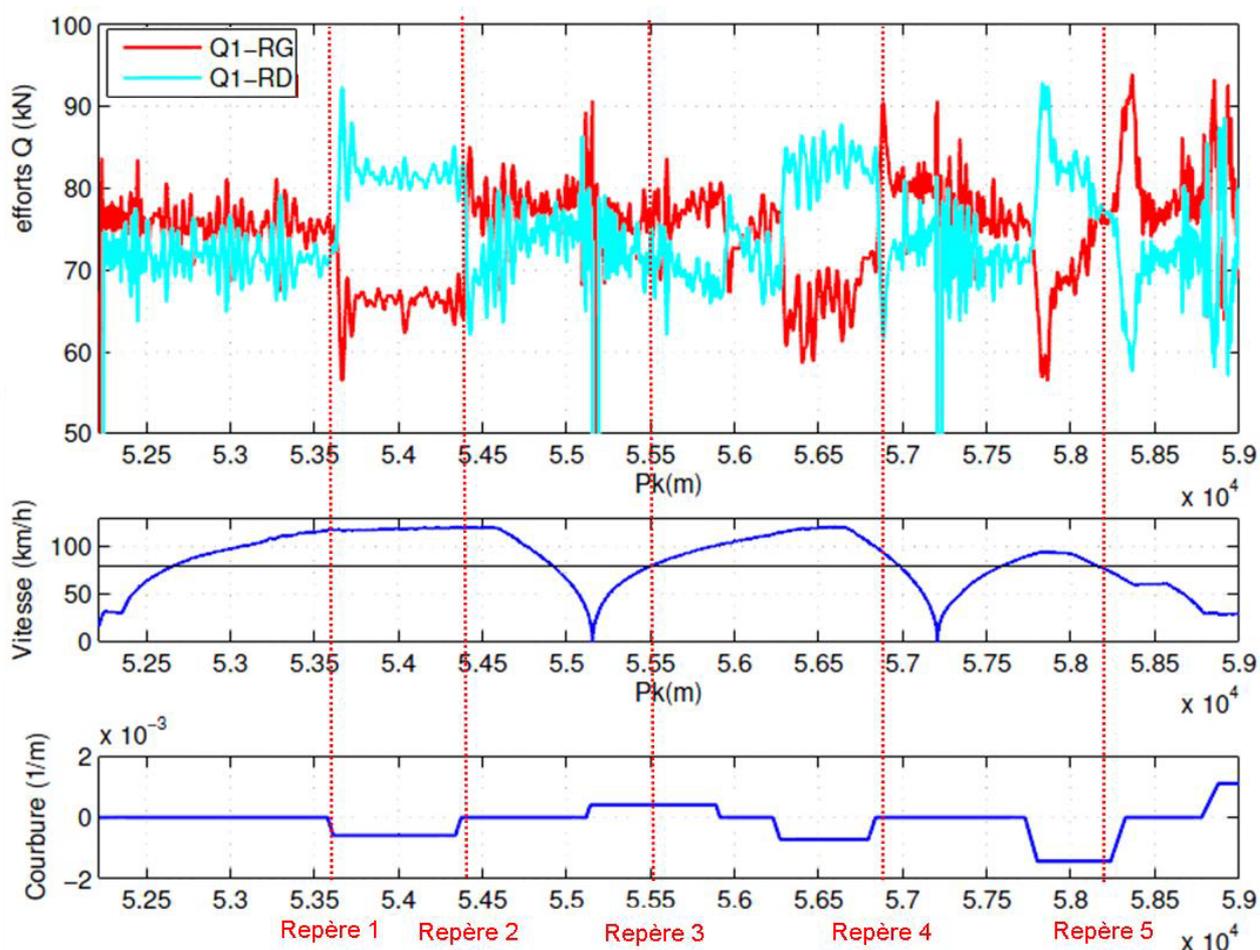


Figure 35 : Efforts verticaux des roues gauche et droite de l'essieu 1 pour la marche 34-2-10 (Circulation vers les PK croissants)

D.2. Validation des mesures des efforts transversaux Y

De la même façon, on vérifie la cohérence des mesures transversales Y (**Figure 36**).

- Entre les repères 1 et 2, l'accélération transversale du bogie étant supposée nulle lors du passage dans un alignement, on vérifie que la somme des efforts transversaux s'annule également.
- Entre les repères 3 et 4, la résultante des efforts sur le bogie étant négative (pour un repère orienté positivement vers la gauche), celui-ci pousse la file de droite qui est bien la file extérieure dans cette courbe à gauche.
- On retrouve également au niveau du repère 5, le passage d'insuffisance à excès de dévers observé sur la figure précédente. Le bogie qui était plaqué contre la file extérieure droite, se retrouve attiré vers la file intérieure gauche.

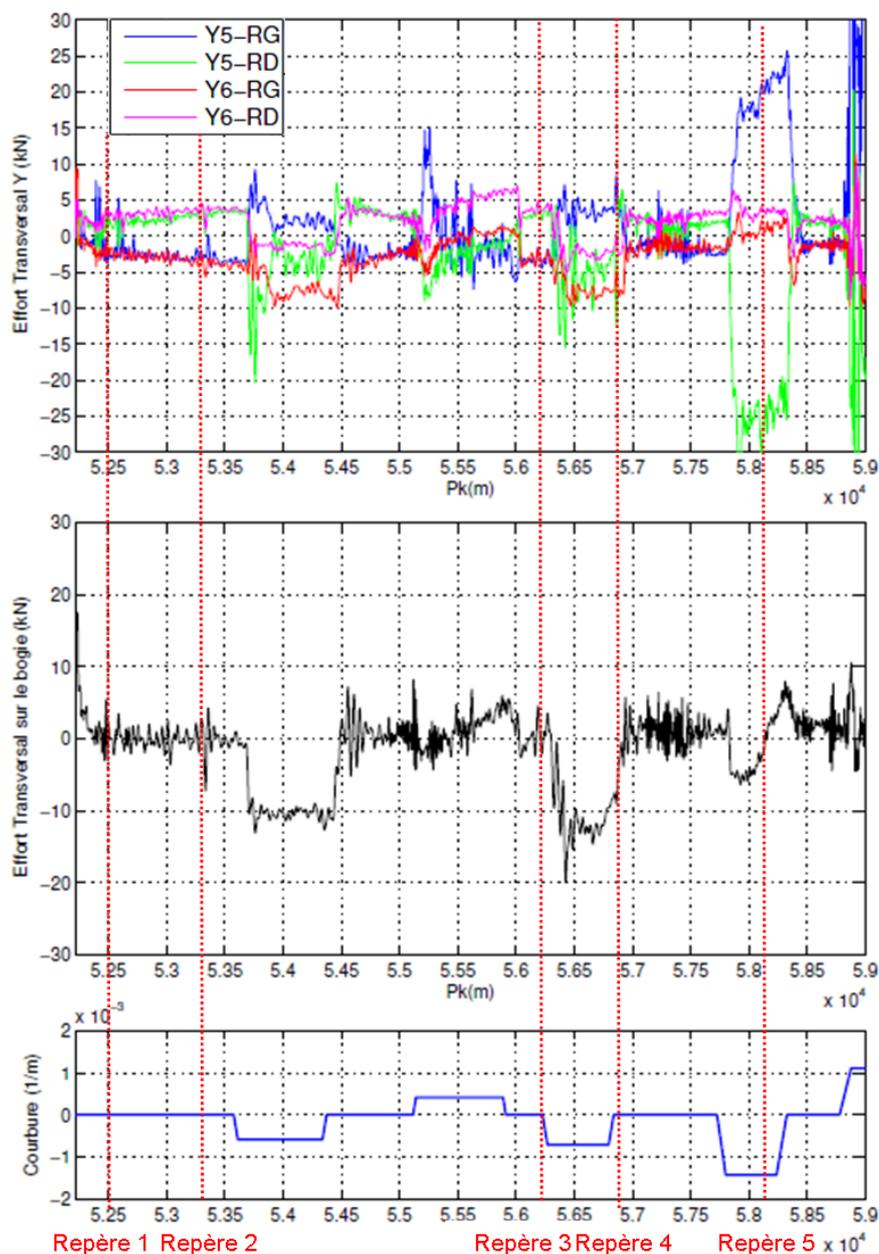


Figure 36 : Efforts transversaux sur le bogie 3 par roue (en haut) puis sommés sur le bogie (au milieu) pour la marche 34-2-10 (Circulation vers les PK croissants)

D.3. Validation des mesures des efforts longitudinaux X

Du fait du caractère expérimental de la mesure des efforts longitudinaux, une attention particulière a été portée à la validation des efforts X afin de garantir leur exploitation.

Pour permettre l'acquisition des signaux d'efforts en X, chaque marche débutait par une coupure de la traction aux alentours de 30 km/h dans une zone en alignement et sans dénivelé. Le bogie est ainsi supposé centré et à plat. La validation des signaux X en partie sur ces portions de circulation, appelée « marche sur l'erre », pour lesquelles les bilans d'efforts au niveau des essieux ou des bogies sont fortement simplifiés. Dans ces conditions, l'effort longitudinal total sur chaque essieu est nul et chaque roue voit un effort dans une direction opposée (**Figure 37**). Dans l'exemple de la marche 34-2-10, lors de la marche sur l'erre (repères rouges) les efforts sur les essieux 1 et 5 s'annulent effectivement bien.

De plus, dans le cas de l'essieu porteur (Figure du haut), lors des alignements et en dehors des phases de freinage (repérables lorsque la courbe bleue de la figure du milieu devient négative), les efforts roue droite et roue gauche sont symétriques et opposés. Néanmoins, contrairement à la marche sur l'erre, il faut noter qu'en régime de traction l'essieu n'a pas de mouvement de lacet (**Chapitre I**) et semble calé d'un côté de la voie puisque les efforts vus par les roues gardent un signe constant. Dans les virages, la résultante d'effort est différente de 0, du fait de la différence de rayon de roulement et donc de glissement entre les roues de l'essieu.

Pour l'essieu moteur, la validation est plus simple (Figure du milieu). En comparant la courbe nominale effort-vitesse (courbe noire), l'effort mesuré dans la bielle (courbe rouge) et la somme des efforts longitudinaux sur l'essieu 5 (courbe bleue), on observe qu'elles se superposent. En conséquence, l'effort en sortie du moteur correspond bien à celui défini dans le cahier des charges et il est intégralement retransmis aux efforts à la jante. L'écart résiduel avec la courbe nominale s'explique par le fait que celle-ci est donnée pour le niveau de traction maximum et un chargement de 6 personnes/m² (ce qui n'est pas le cas de la marche étudiée). On observe également une bonne correspondance entre les situations de freinage et l'évolution de la courbe bleue.

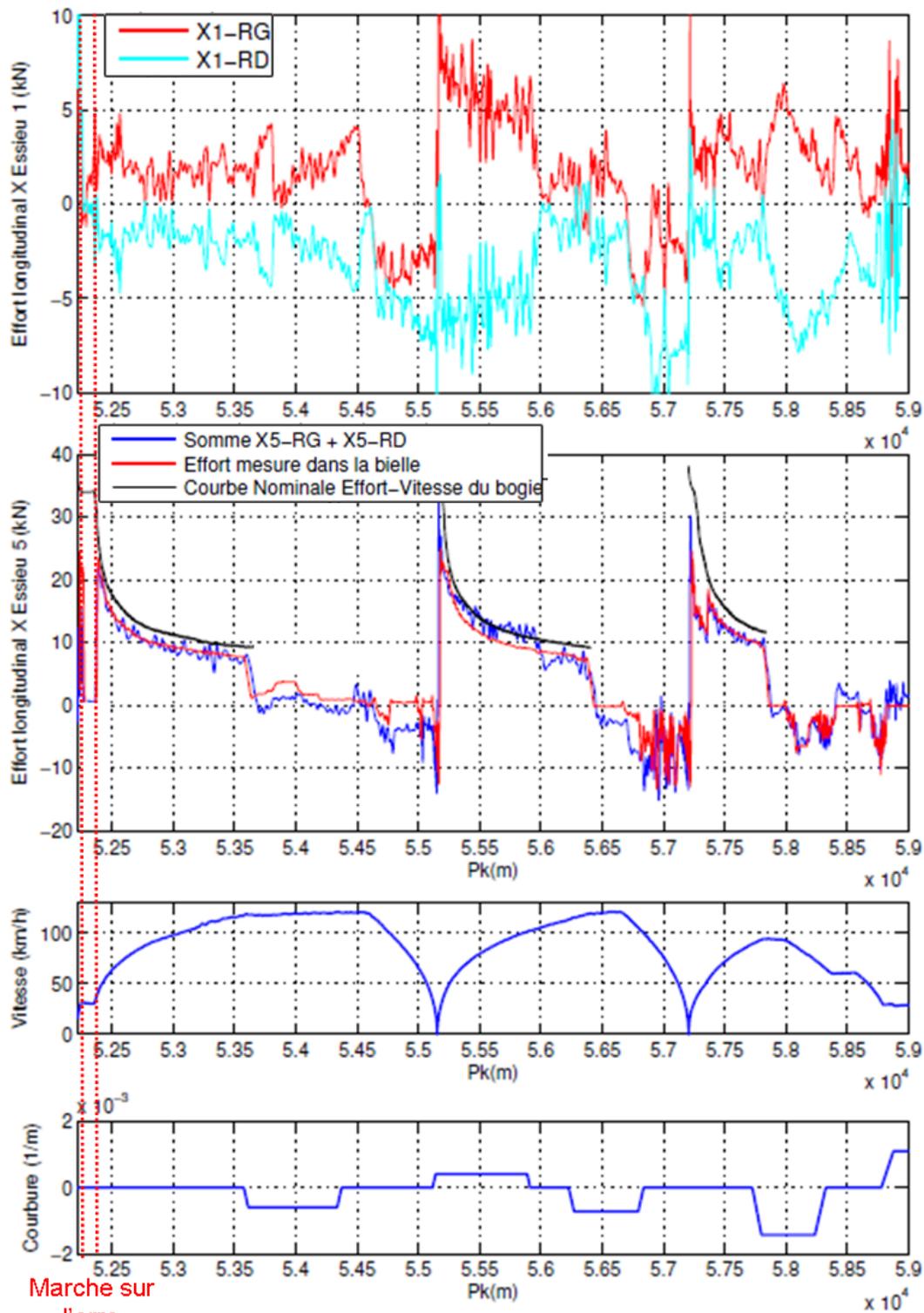


Figure 37 : Efforts longitudinaux pour la marche 34-2-10 : Par roue sur l'essieu 1 (en haut) Sommés sur l'essieu 5 (au milieu) (Circulation vers les PK croissants)

L'analyse des mesures d'efforts dans les 3 directions permet donc un recoupement cohérent entre les différents signaux, mais également avec la théorie de la dynamique ferroviaire et les simulations numériques. L'étape de validation est donc positive et les signaux sont jugés interprétables pour déterminer les conditions de contact par roue dans la zone de squats de Bussy-St-Georges comprise dans un alignement en sortie de stations entre les PK 52500 et 53000.

Annexe E : Présentation de la soutenance de thèse du 17/03/2014

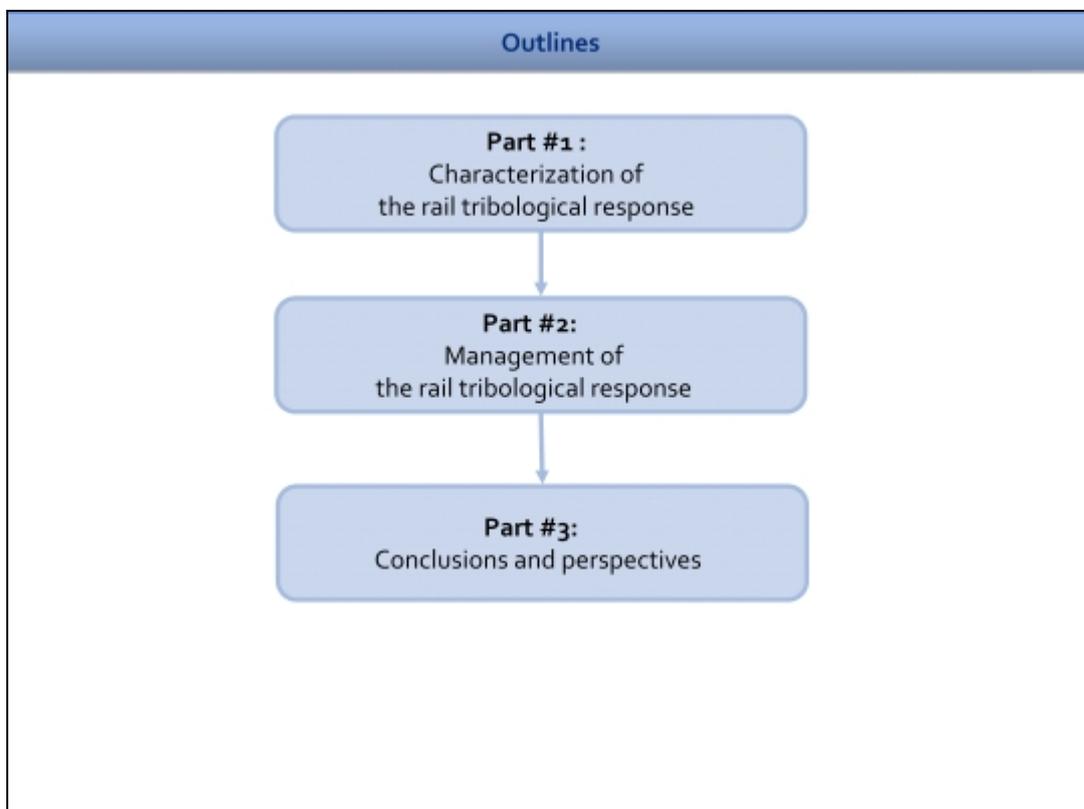


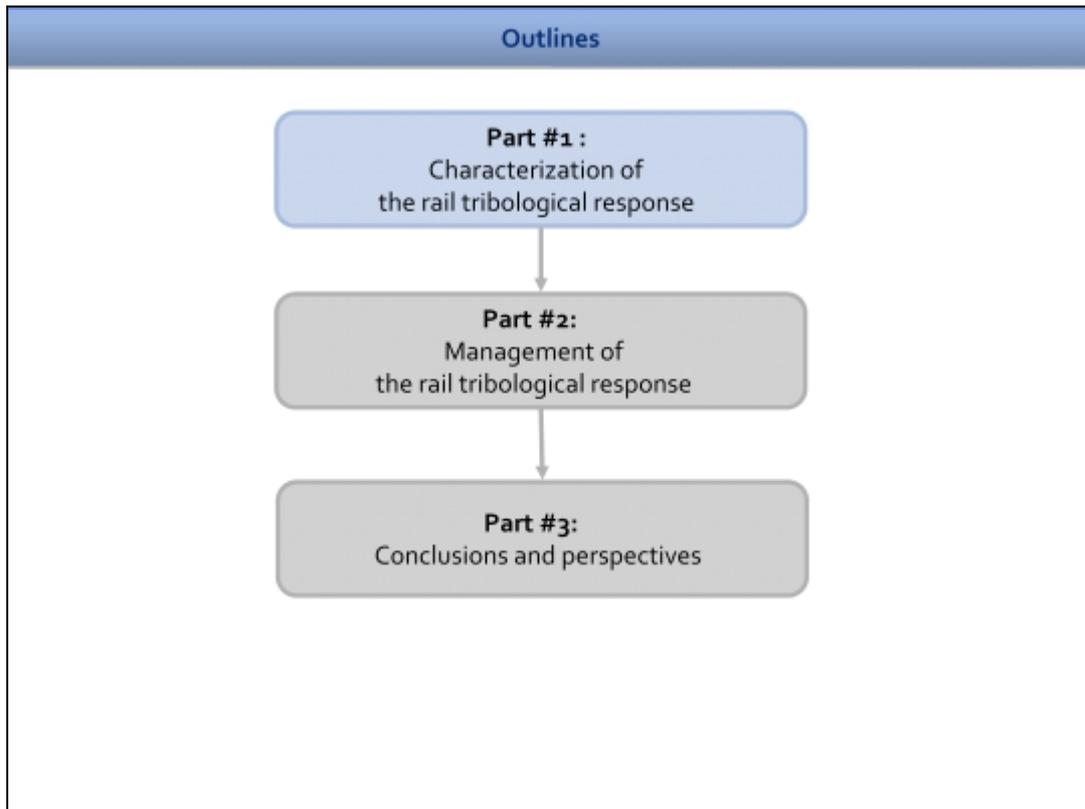
From railway dynamic to microstructural adaptation of rail
- TTS contribution to tribological response of steels -
- Case of the squat rail defect -

Samuel Simon ^[1] ^[2]

[1] Université de Lyon, CNRS
INSA-Lyon, LaMCoS UMR5259, F-69621, France
[2] Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP),
50, rue Roger Salengro, 94724 Fontenay-Sous-Bois Cedex, France

17/03/2014





Classic description of squat initiation

- Problem for railway safety
- Initiation mechanism is still misunderstood
- Seems to result from accumulation of plastic deformation *

* R. Nakamura, Report of Railway Research Institute, 1965

Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 5

Classic description of squat initiation

- Problem for railway safety
- Initiation mechanism is still misunderstood
- Seems to result from accumulation of plastic deformation *

* R. Nakamura, Report of Railway Research Institute, 1965

Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 6

Recent observations close to squats

- Observations of White Etching Layer close to well-developed squats

Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 7

Recent observations close to squats

W. Daniel, JRRT 2013

Squats

A-A M. Steenbergen, Journal of Fatigue 2013

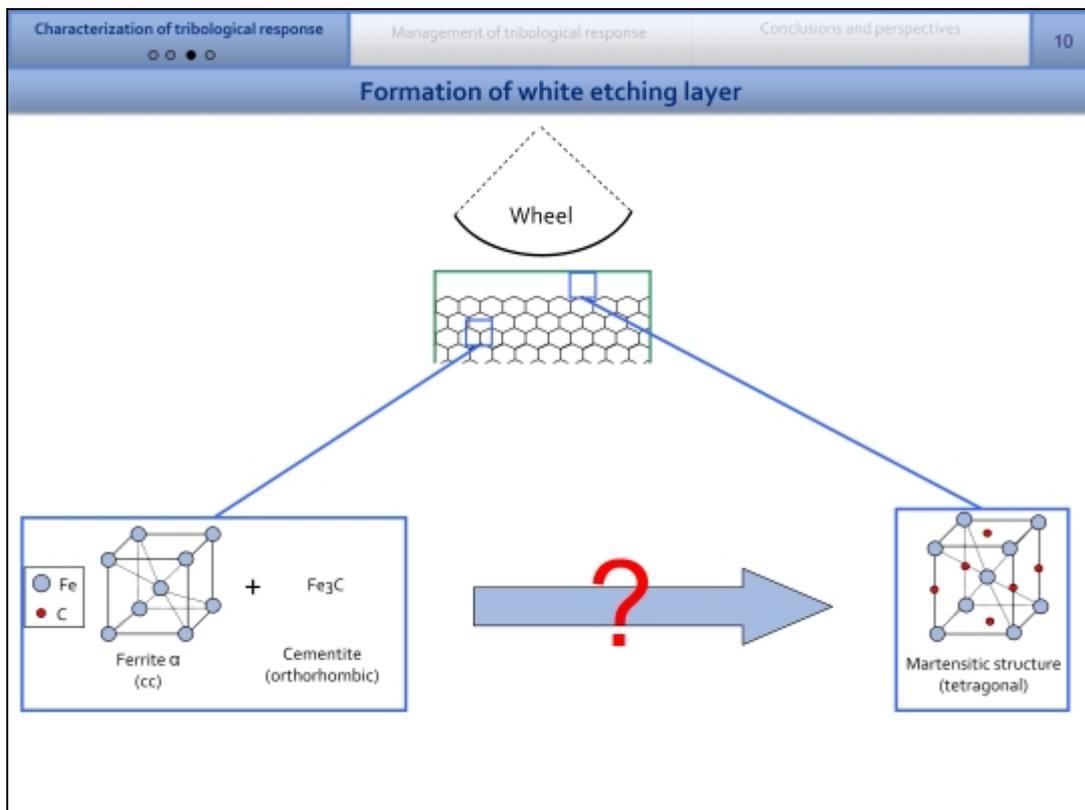
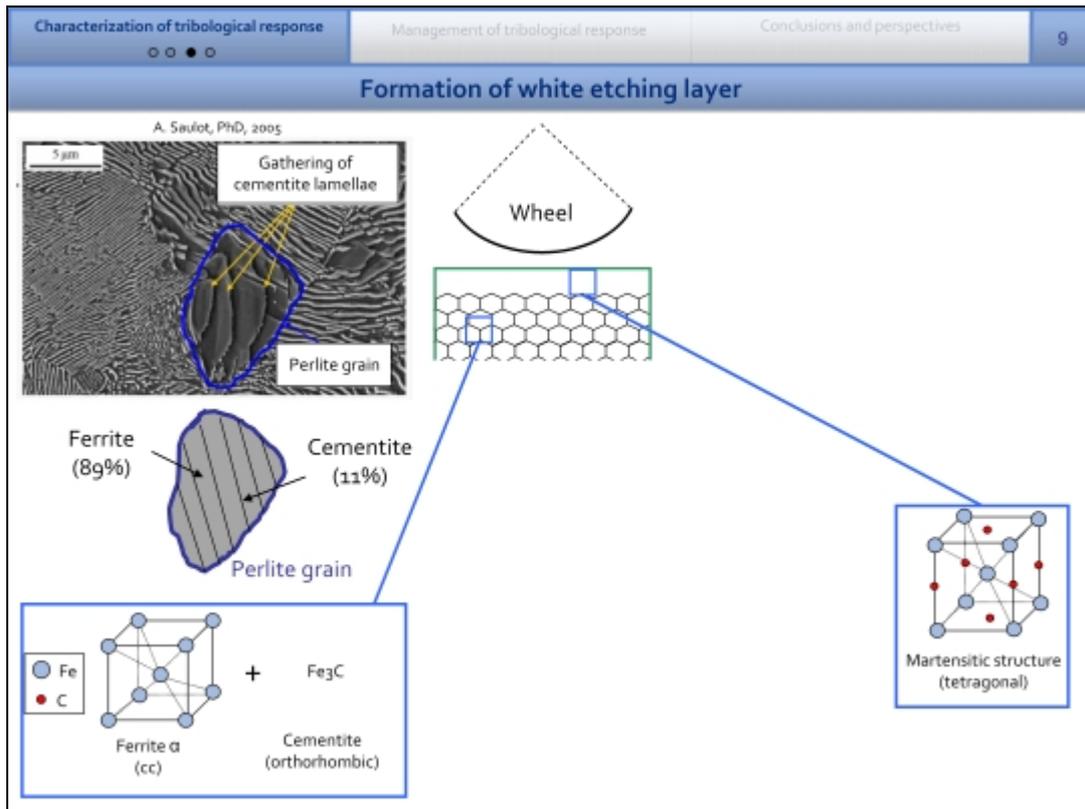
D. Fletcher, JRRT 2013

• Observations of White Etching Layer close to well-developed squats

• What is the influence of WEL on squat formation ?
 ↳ Where is the WEL formation in the Detachment / Deformation balance ?

Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 8

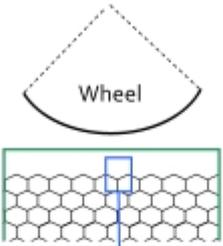
Formation of white etching layer



Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 11

Formation of white etching layer

- 2 mechanisms of formation
- Non-exclusive mechanisms
- Multi-physics origin of WEL



Thermal formation

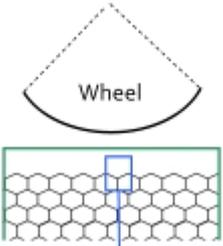


Mechanical formation

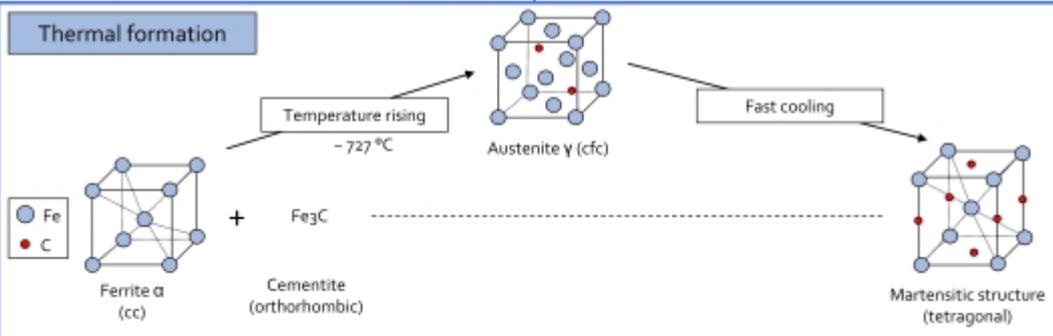
Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 12

Formation of white etching layer

- 2 mechanisms of formation
- Non-exclusive mechanisms
- Multi-physics origin of WEL



Thermal formation



Mechanical formation

Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 13

Formation of white etching layer

- 2 mechanisms of formation
- Non-exclusive mechanisms
- Multi-physics origin of WEL

Thermal formation

Temperature rising -727°C

Austenite γ (fcc)

Fast cooling

Martensitic structure (tetragonal)

Mechanical formation

Macro-slippage

Linear displacement

Wheel perimeter

$1\% \rightarrow 100^{\circ}\text{C}^*$

* M.A. TANVIR, Wear, 1980

Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 14

Formation of white etching layer

- 2 mechanisms of formation
- Non-exclusive mechanisms
- Multi-physics origin of WEL

Thermal formation

Ferrite α (cc) + Fe_3C (Cementite (orthorhombic))

Large plastic strains under pressure and shear forces

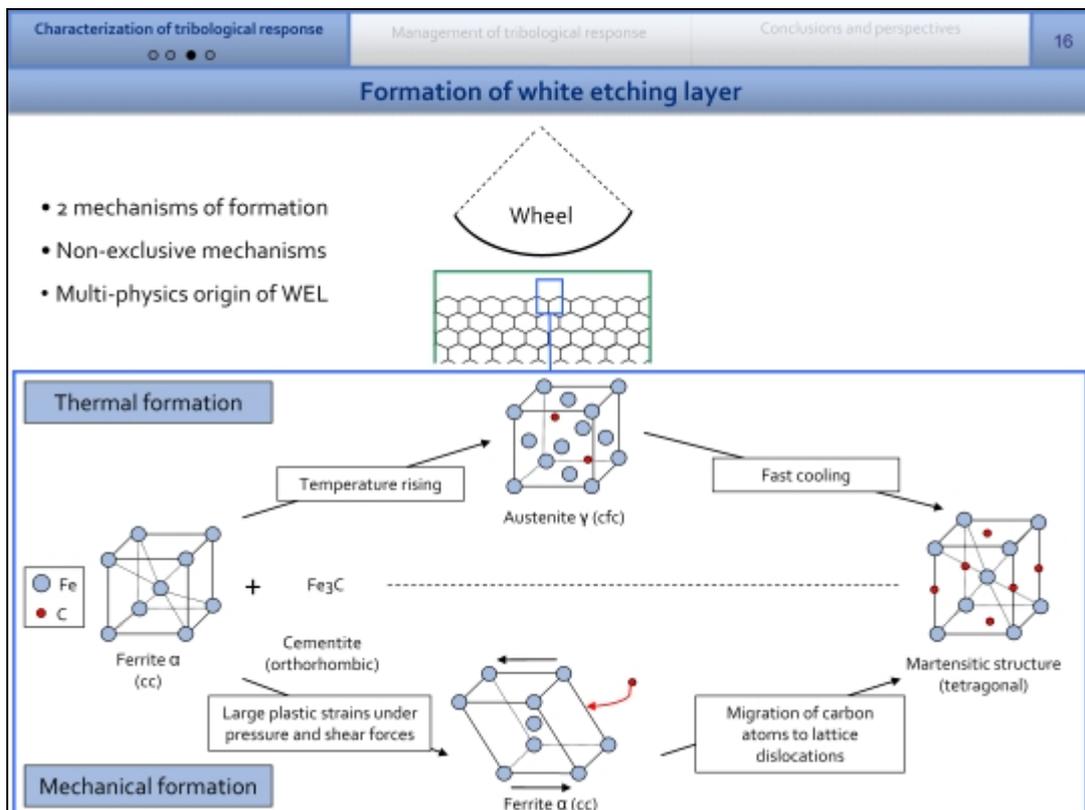
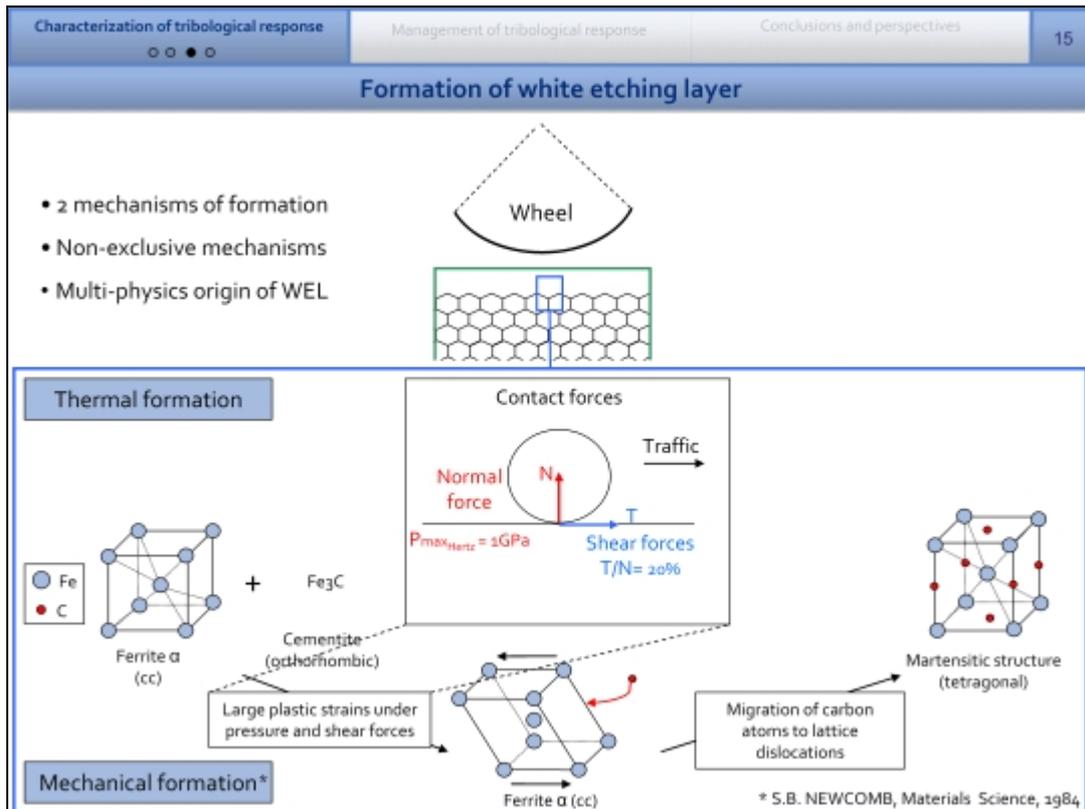
Ferrite α (cc)

Migration of carbon atoms to lattice dislocations

Martensitic structure (tetragonal)

Mechanical formation*

* S.B. NEWCOMB, Materials Science, 1984



Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 17

Tribological response of rail microstructure

- 2 mechanisms of formation
- Non-exclusive mechanisms
- Multi-physics origin of WEL

• Which is the influence of WEL on squat formation ?
 ↳ Where is the WEL formation in the Detachment / Deformation balance ?

Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 18

Tribological response of rail microstructure

- 2 mechanisms of formation
- Non-exclusive mechanisms
- Multi-physics origin of WEL

• Which is the influence of WEL on squat formation ?
 ↳ Where is the WEL formation in the Detachment / Deformation balance ?

Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 19

Tribological response of rail microstructure

- 2 mechanisms of formation
- Non-exclusive mechanisms
- Multi-physics origin of WEL

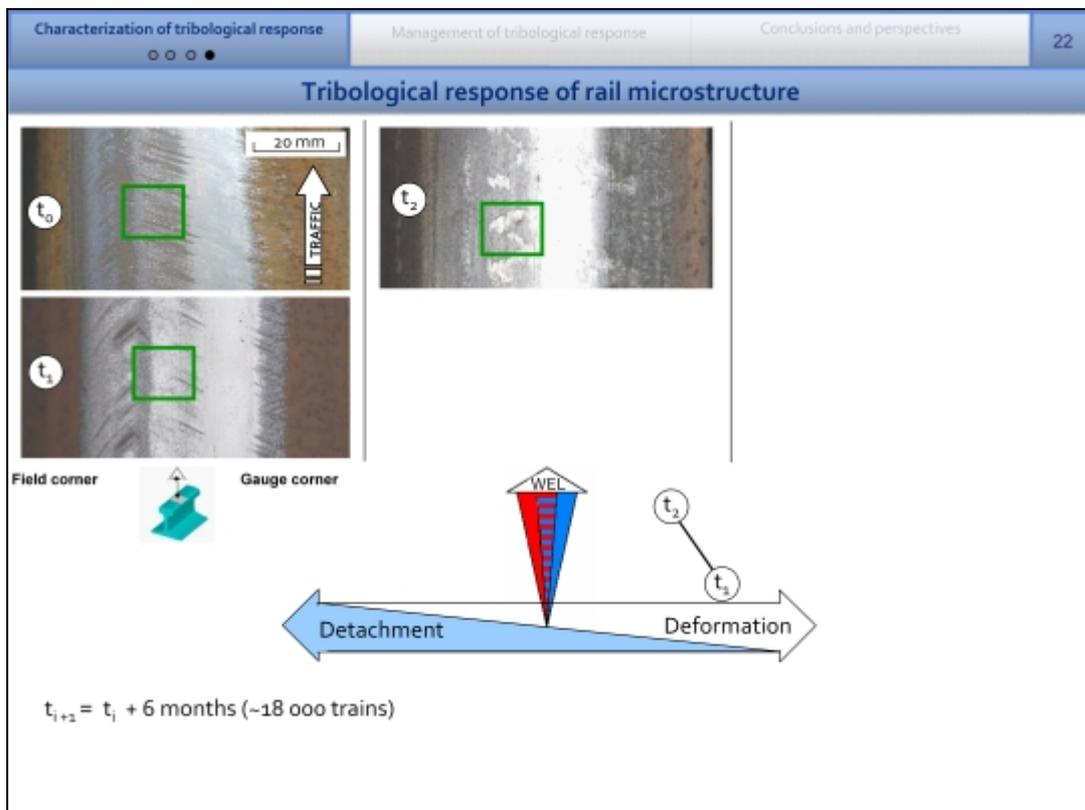
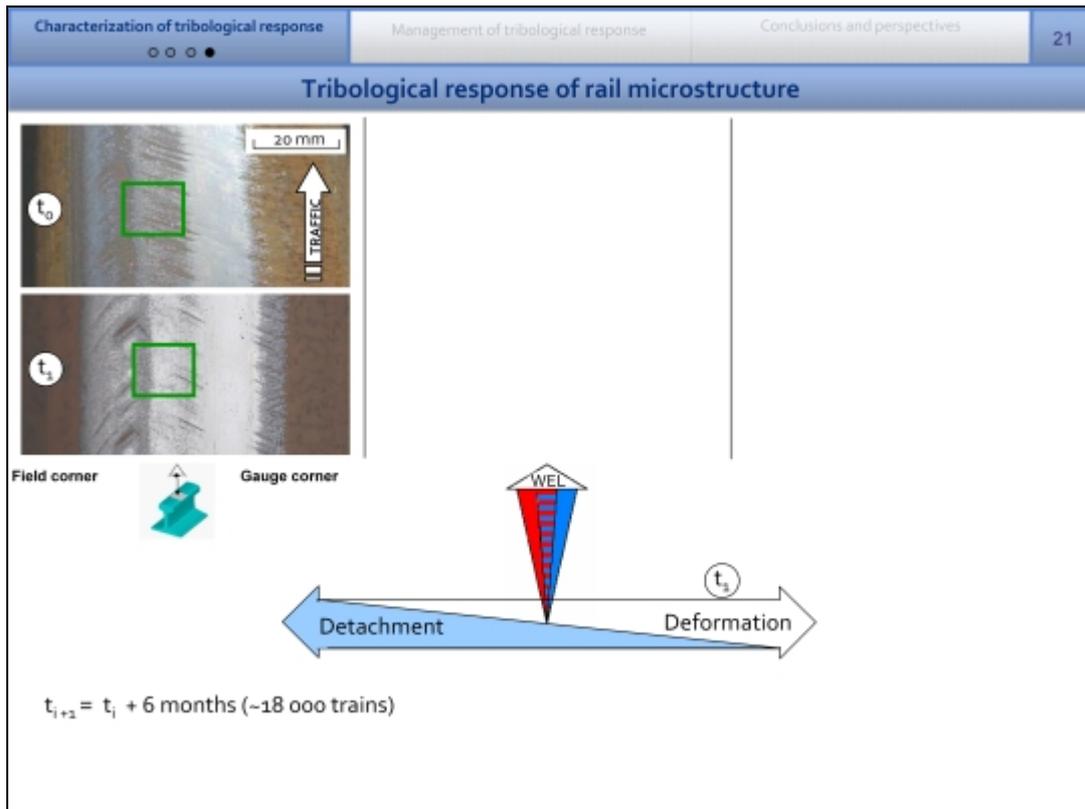
- Which is the influence of WEL on squat formation ?
- ↳ Where is the WEL formation in the Detachment / Deformation balance ? ✓

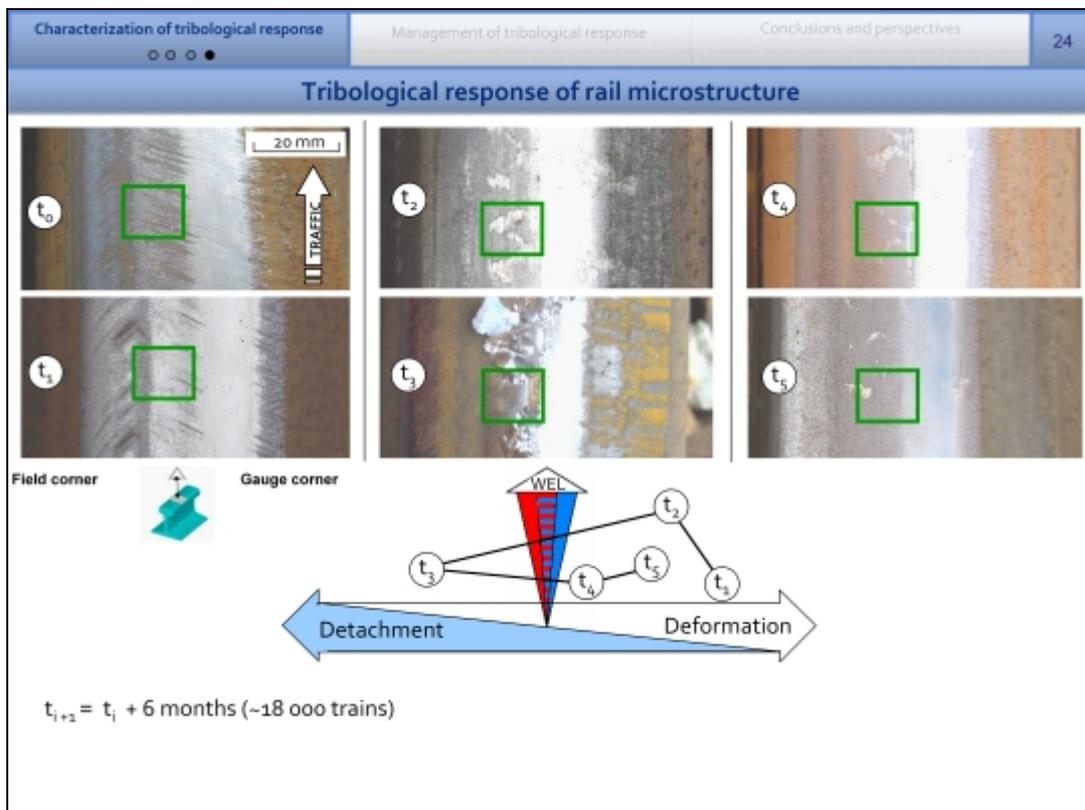
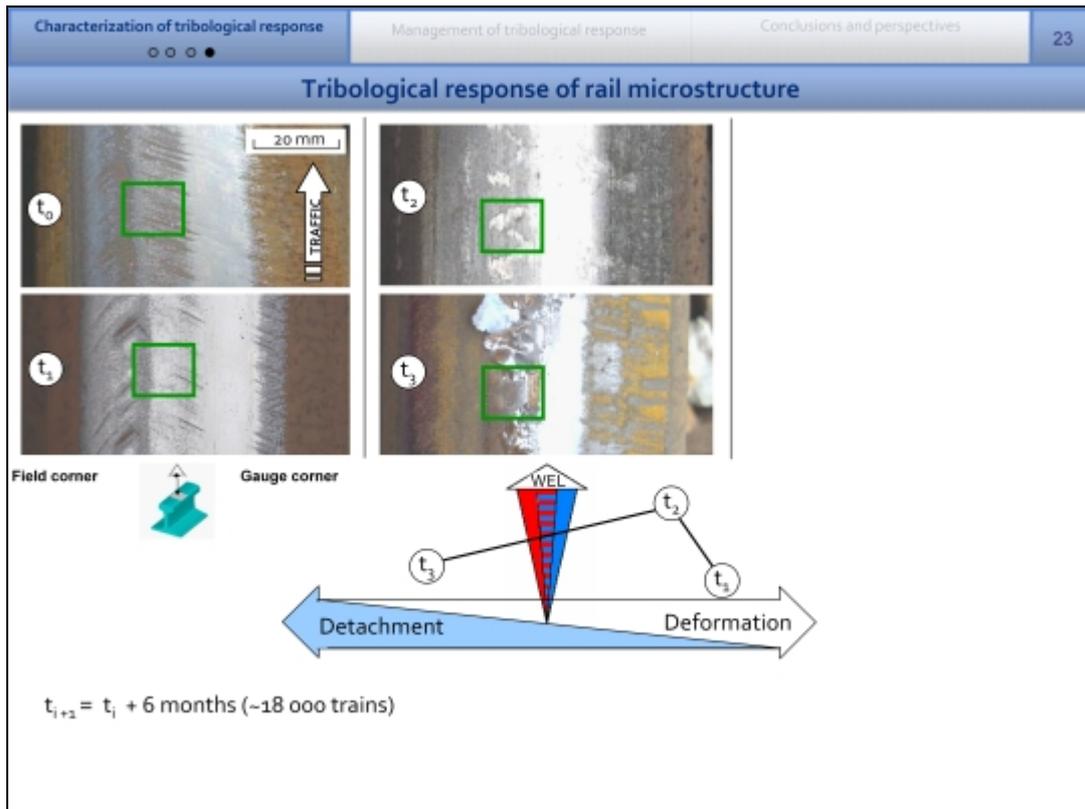
Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 20

Tribological response of rail microstructure

- 2 mechanisms of formation
- Non-exclusive mechanisms
- Multi-physics origin of WEL

- Which is the influence of WEL on squat formation ?
- ↳ Where is the WEL formation in the Detachment / Deformation balance ? ✓





Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 25

Tribological response of rail microstructure

- 2 mechanisms of formation
- Non-exclusive mechanisms
- Multi-physics origin of WEL

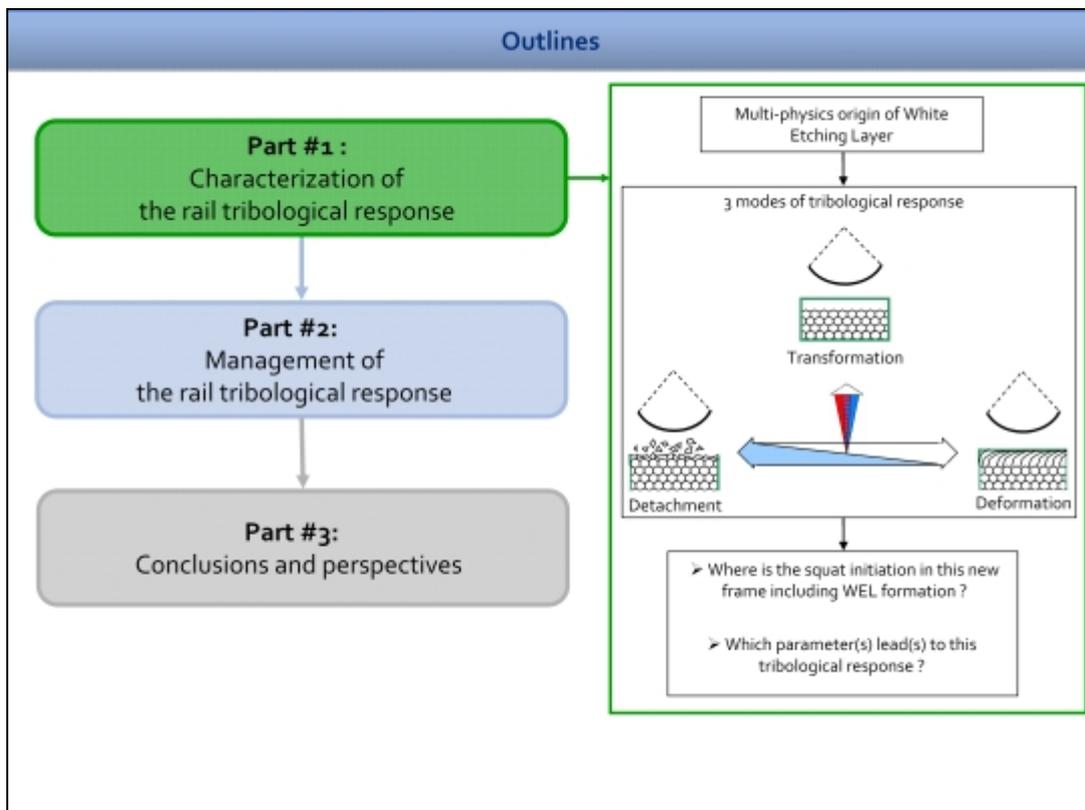
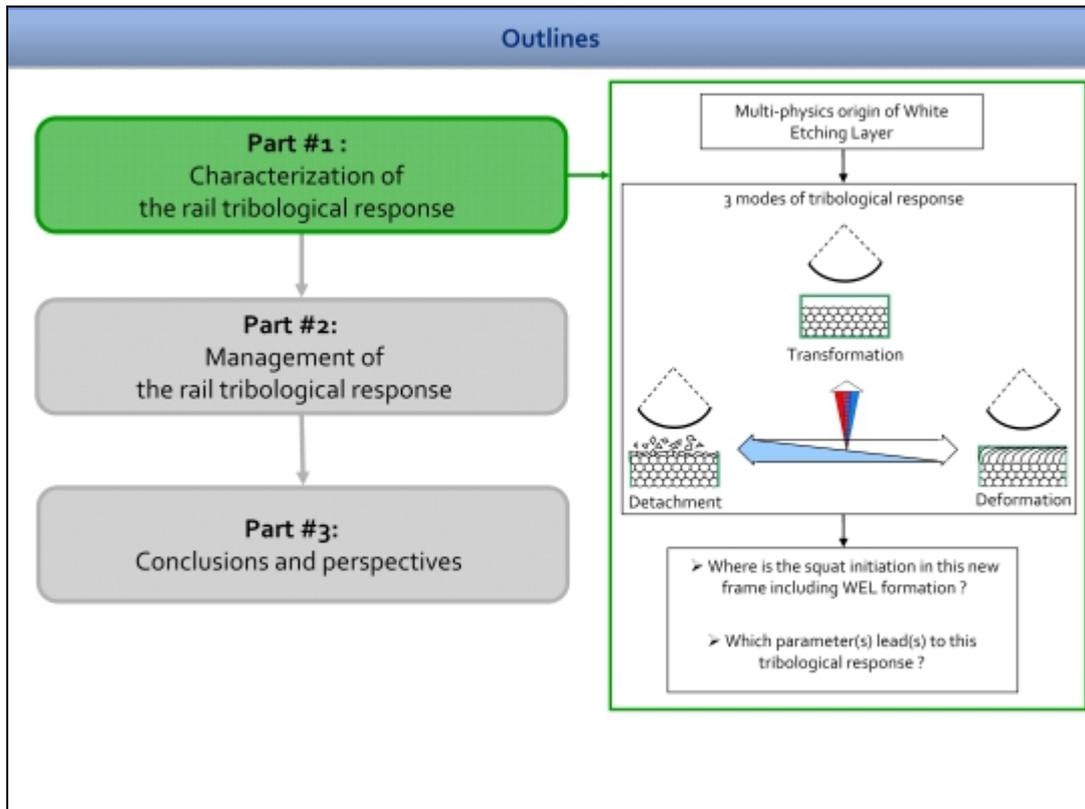
- Which is the influence of WEL on squat formation ?
- ↳ Where is the WEL formation in the Detachment / Deformation balance ? ✓

Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 26

Tribological response of rail microstructure

- 2 mechanisms of formation
- Non-exclusive mechanisms
- Multi-physics origin of WEL

- Which is the influence of WEL on squat formation ?
- ↳ Which is the rail tribological response at the time of squat initiation ?
- ↳ Which parameters manage this response ?



Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 29

● ○ ○ ○

Site 1 : Microstructure close to an incipient squat

Field corner

Incipient Squat

Gauge corner (20 mm)

Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 30

● ○ ○ ○

Site 1 : Microstructure close to an incipient squat

Field corner

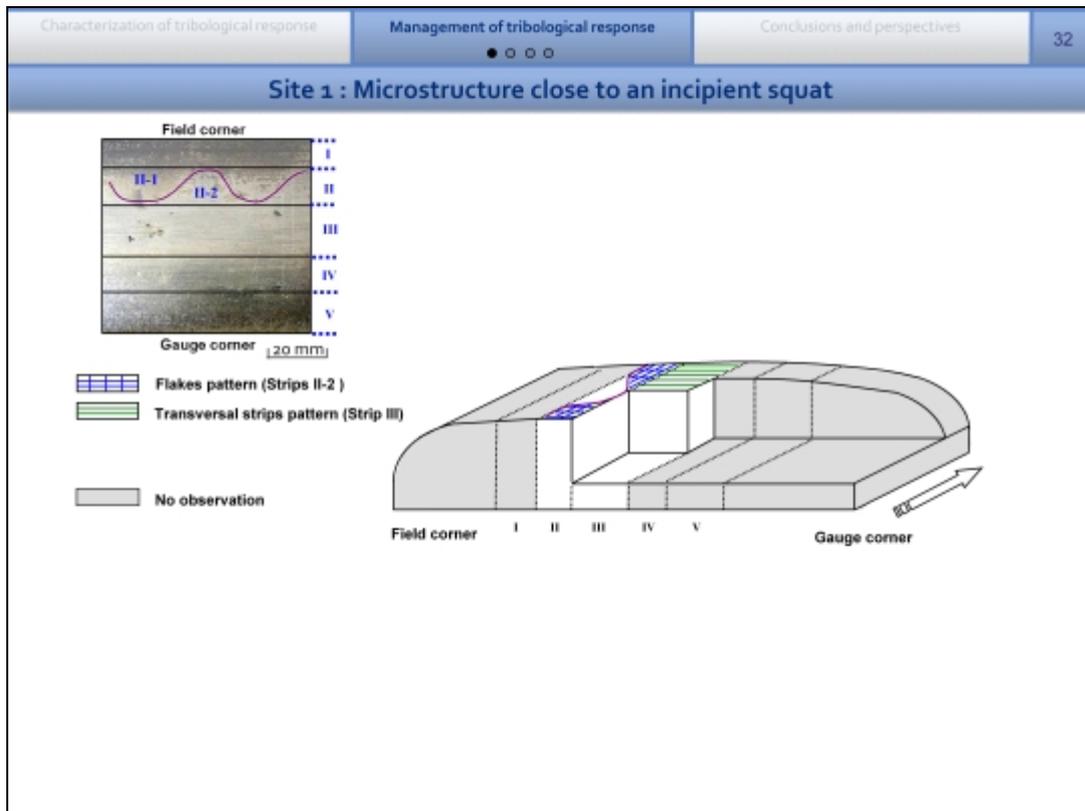
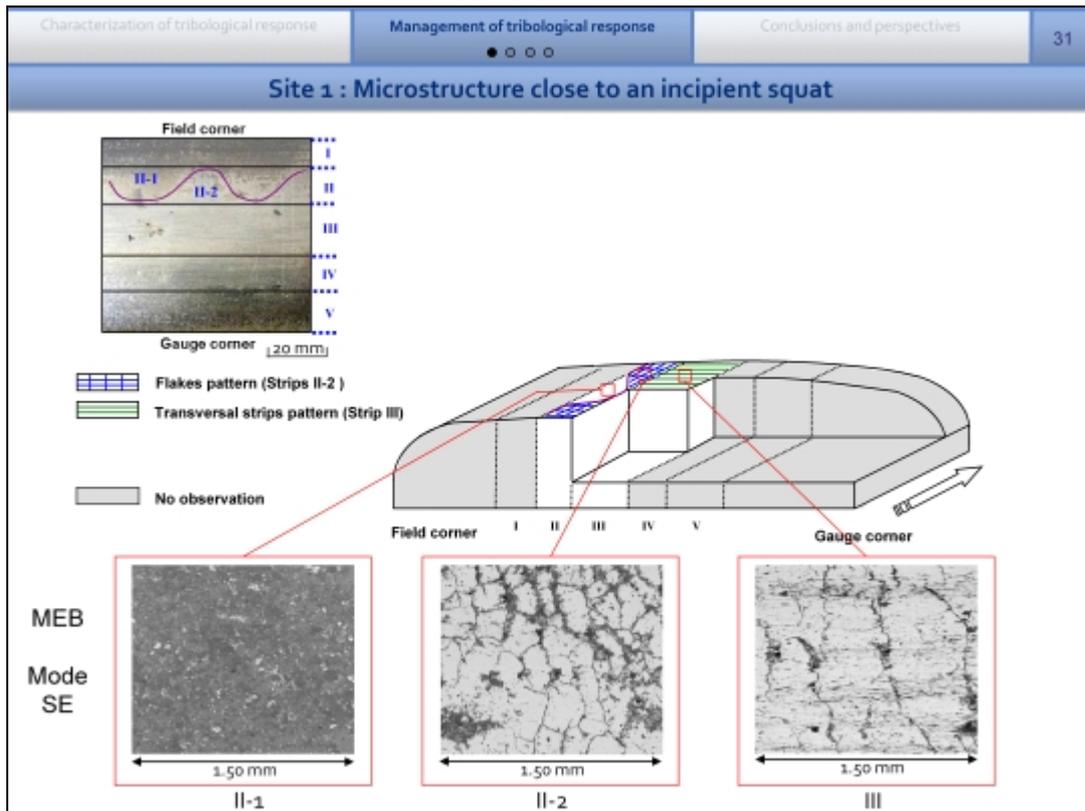
II-1 II-2

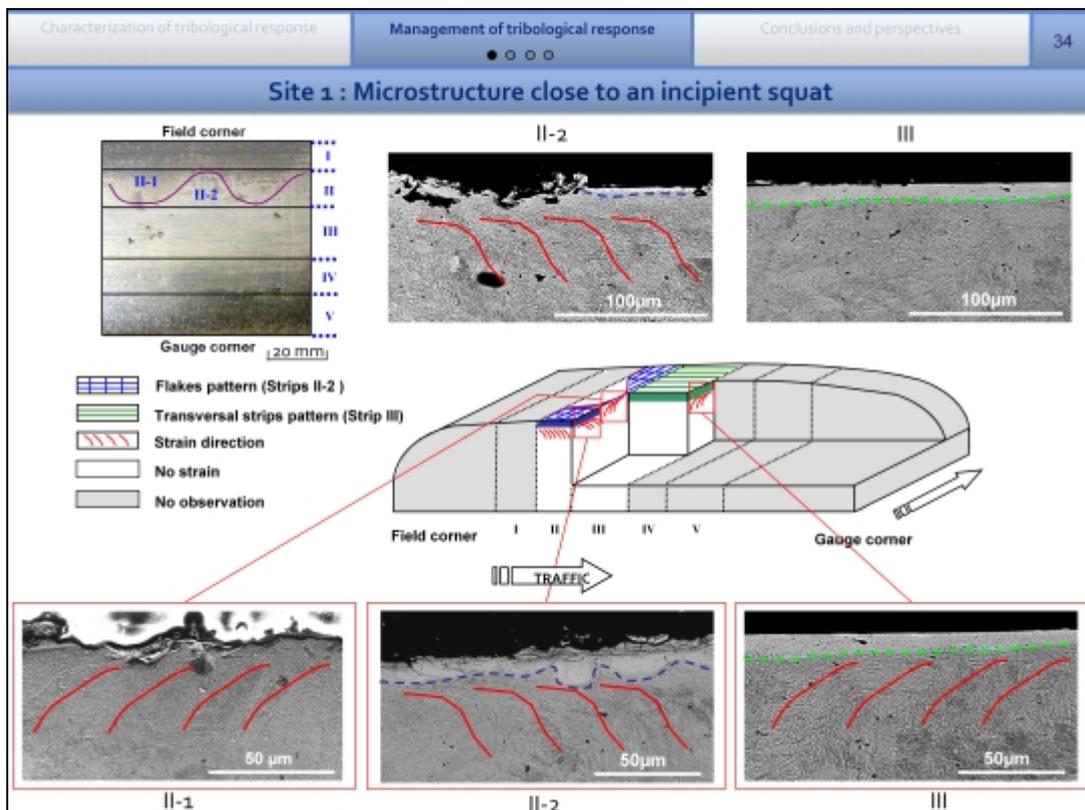
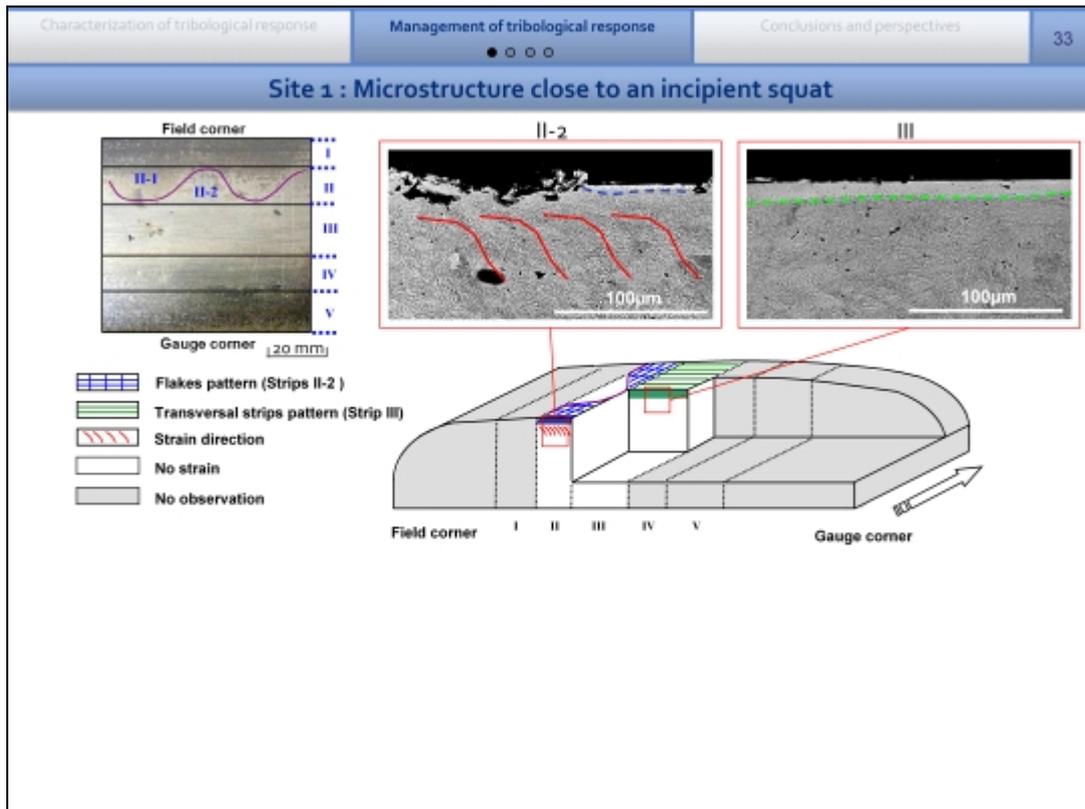
Gauge corner (20 mm)

Incipient squat

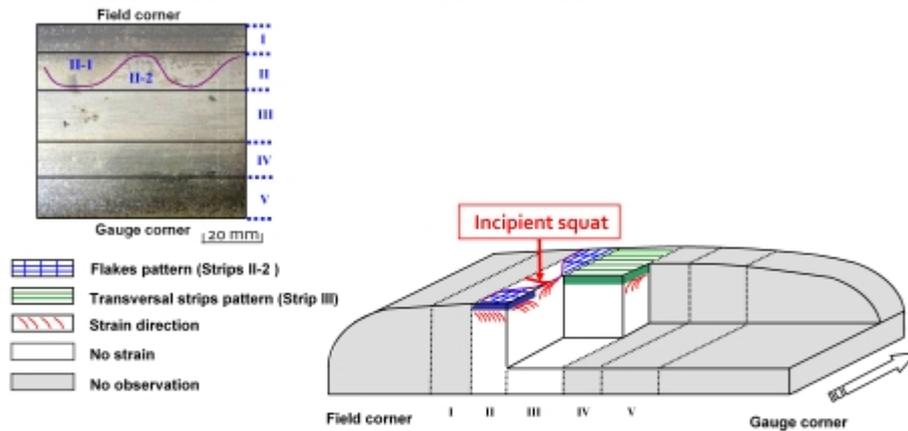
Field corner I II III IV V Gauge corner

No observation





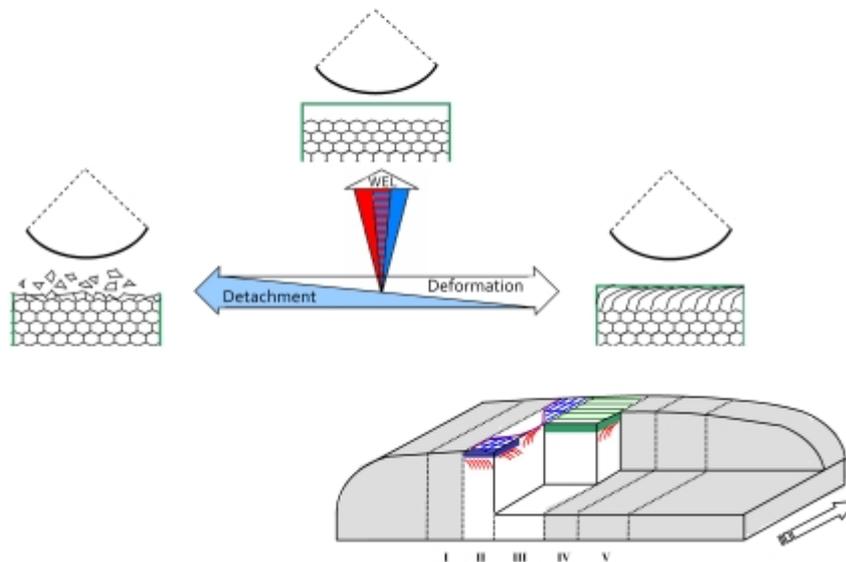
Site 1 : Microstructure close to an incipient squat



Incipient squat occurs at the border between strips II and III

→ Microstructure close to an incipient squat = WEL + Plastic deformations

Site 1 : Microstructure close to an incipient squat



Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 37

● ● ● ●

Site 1 : Microstructure close to an incipient squat

Characterization of tribological response Management of tribological response Conclusions and perspectives 38

● ● ● ●

Site 1 : Microstructure close to an incipient squat

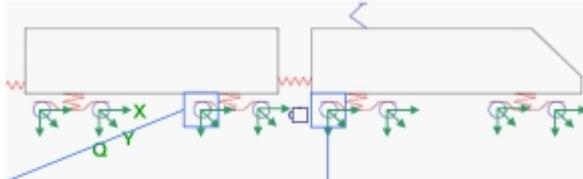
Which dynamical behavior leads to this tribological response ?

Characterization of tribological response **Management of tribological response** Conclusions and perspectives 39

○ ● ○ ○

Mechanical squat formation

Collected data :

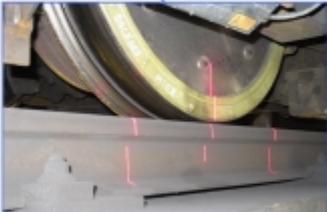




Slippage of each axle



Contact forces for the 8 first axles



Wheel rail contact position

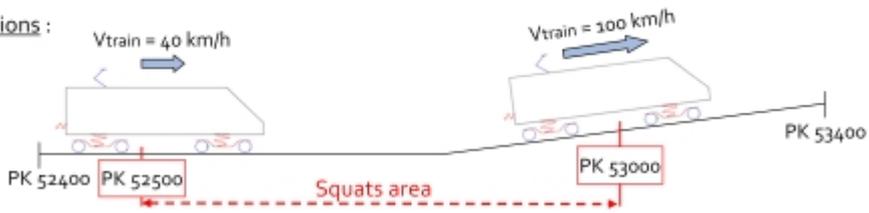
Putting on the railway with this instrumentation

Characterization of tribological response **Management of tribological response** Conclusions and perspectives 40

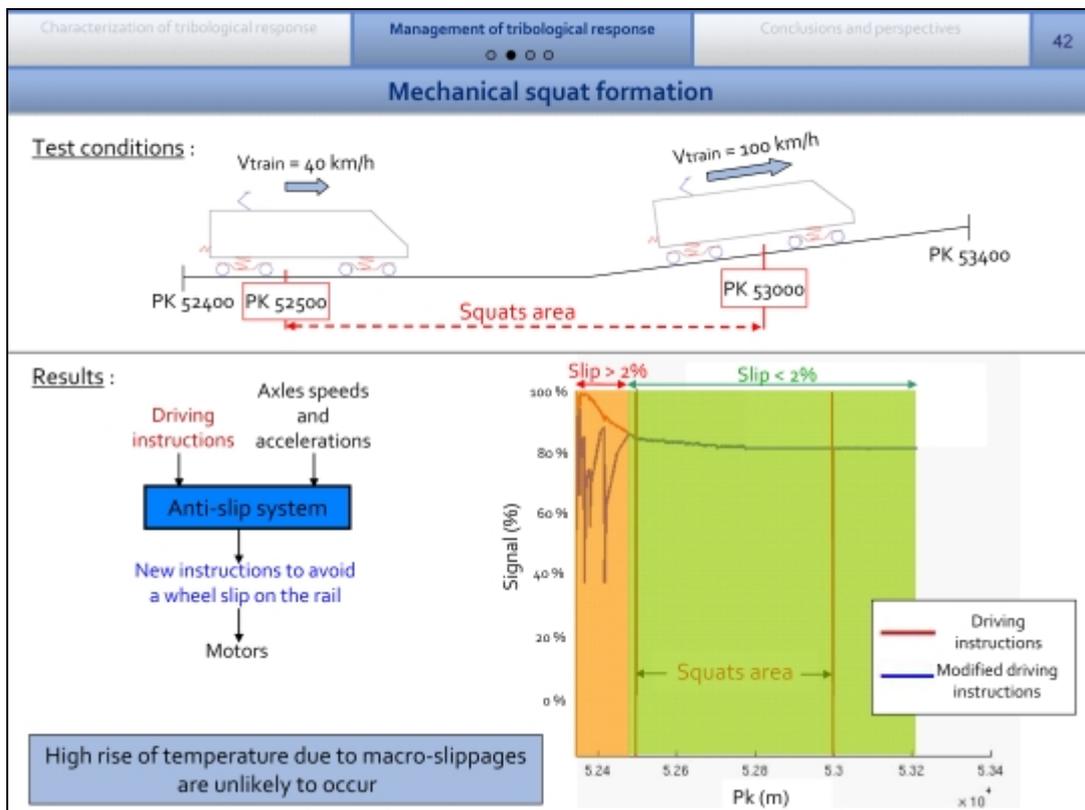
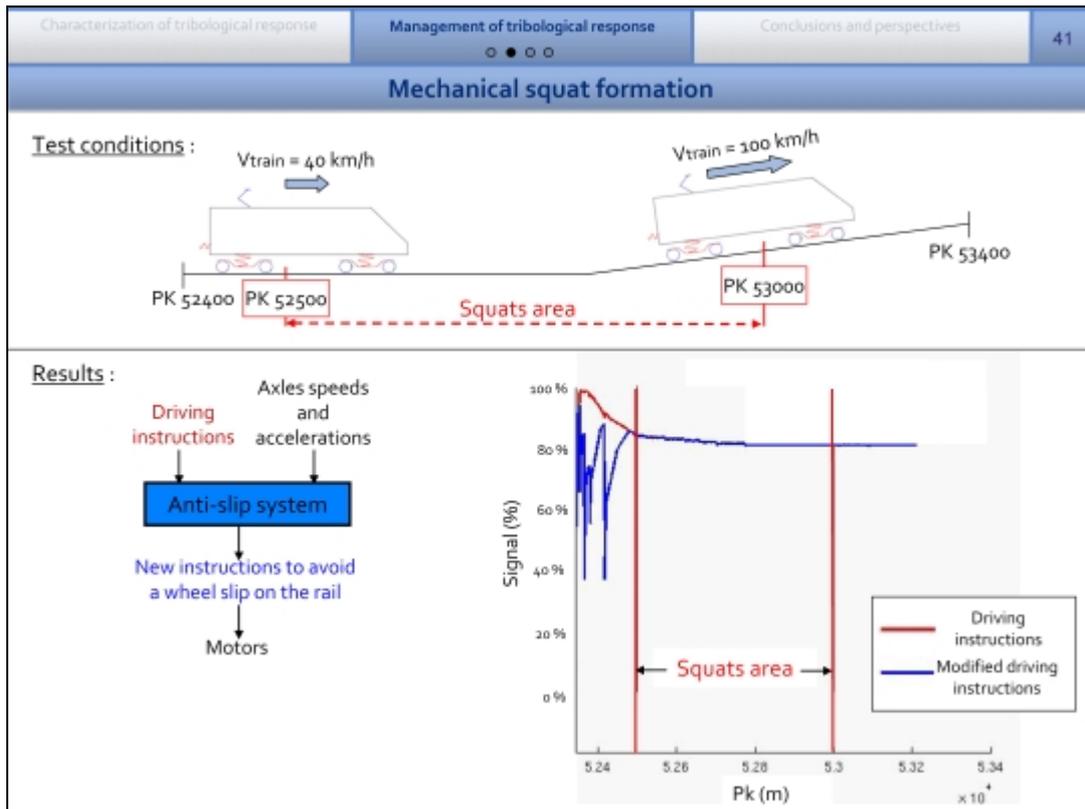
○ ● ○ ○

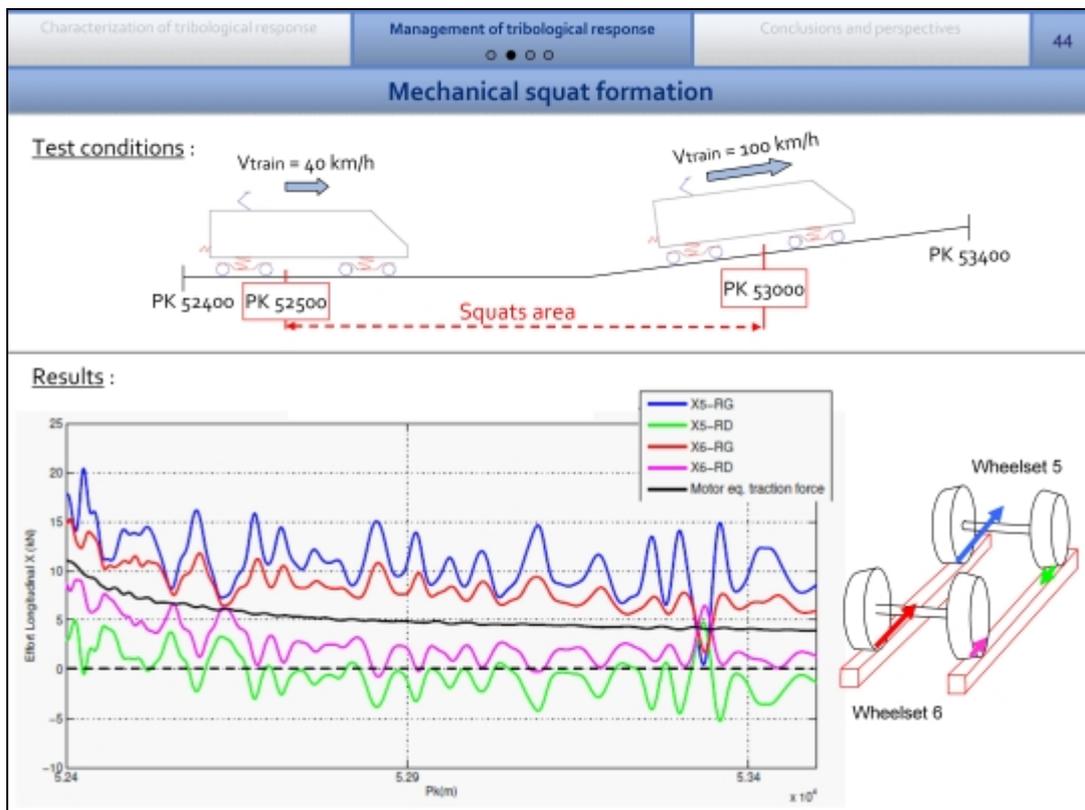
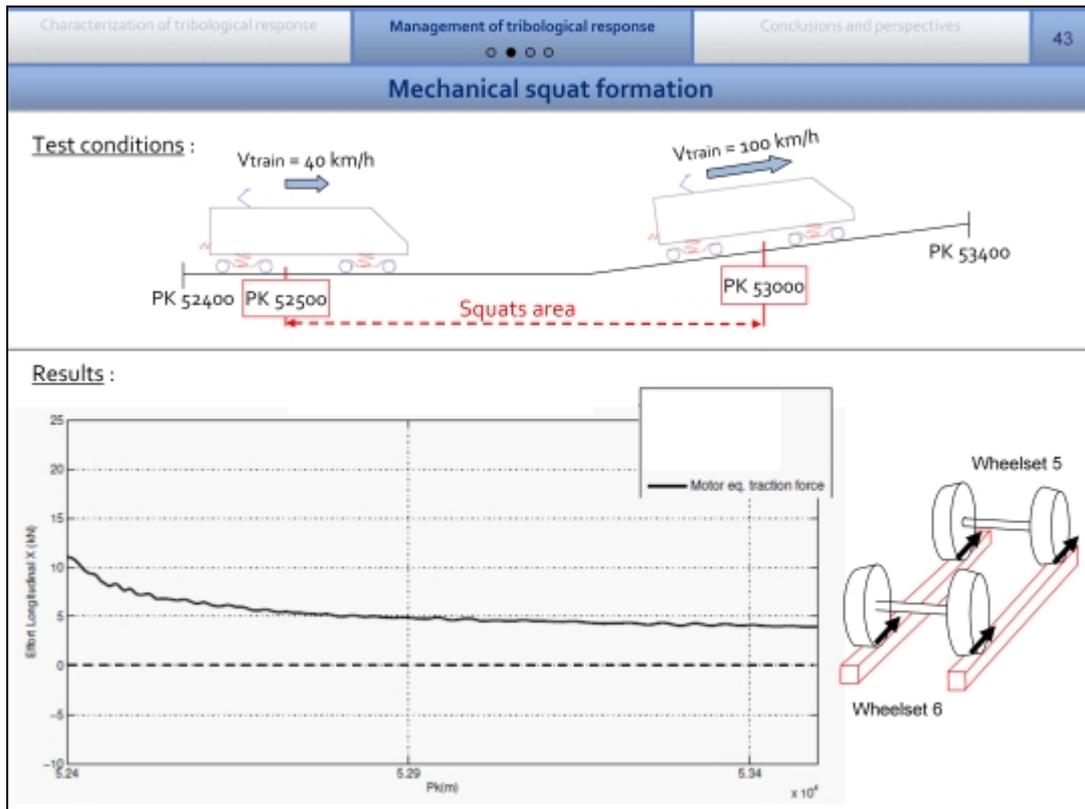
Mechanical squat formation

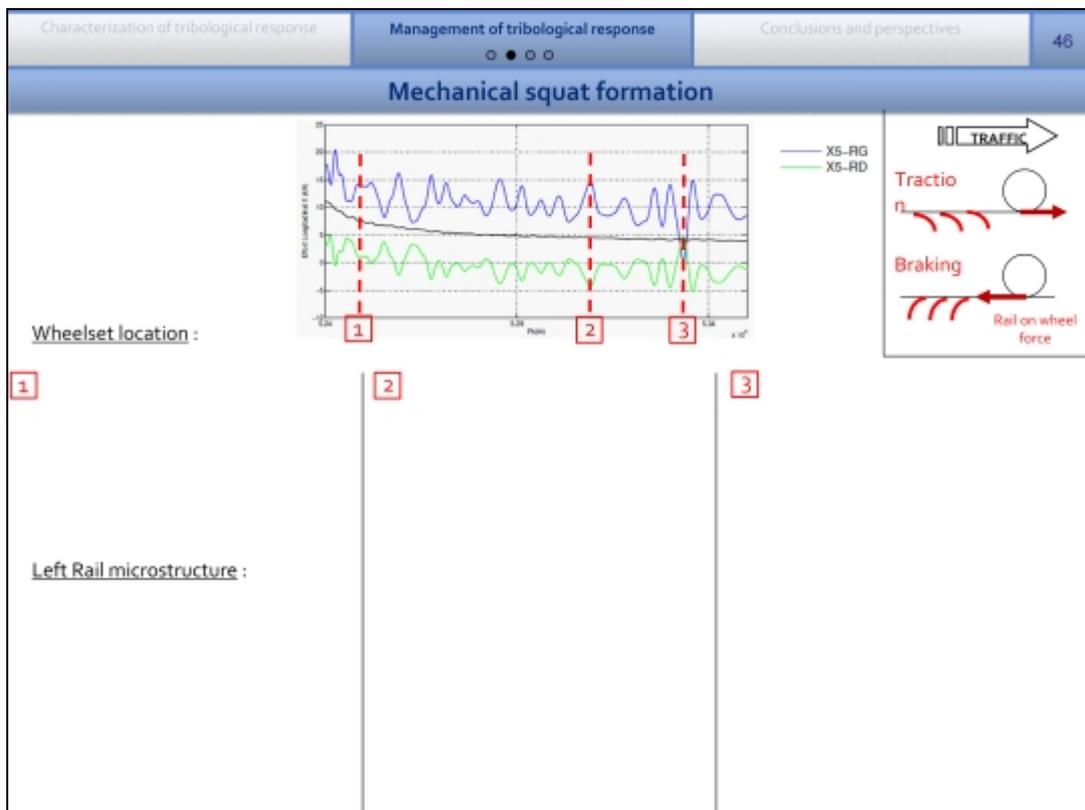
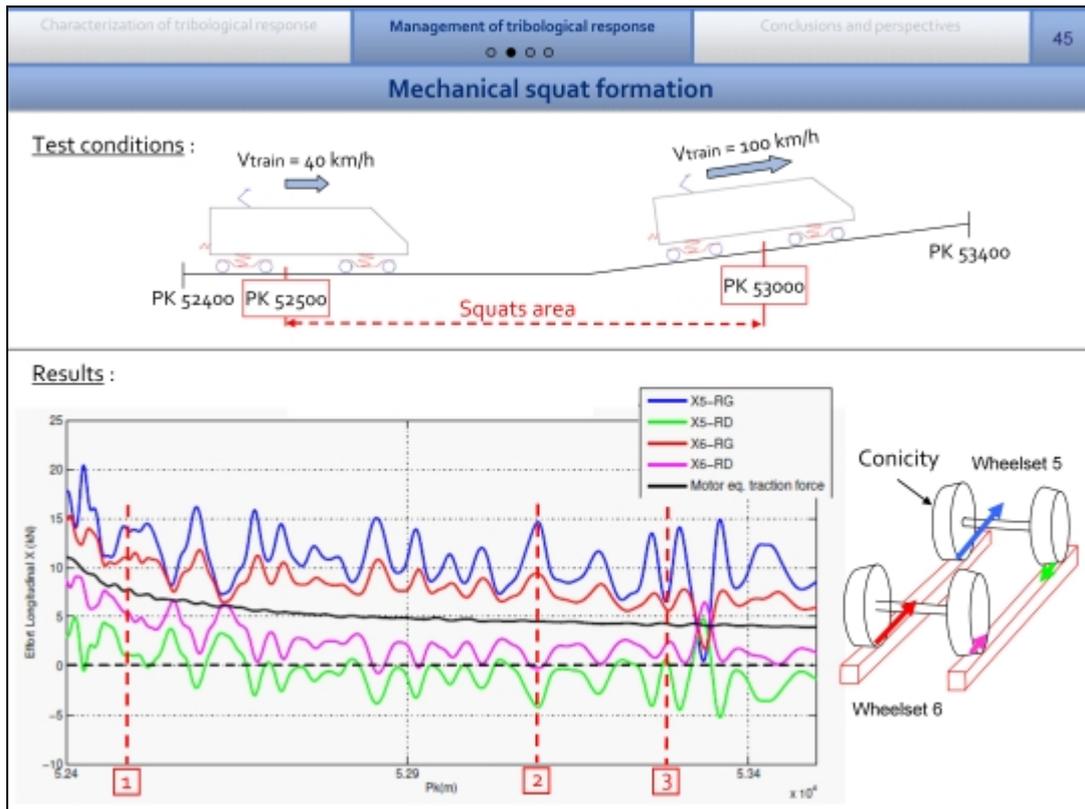
Test conditions :

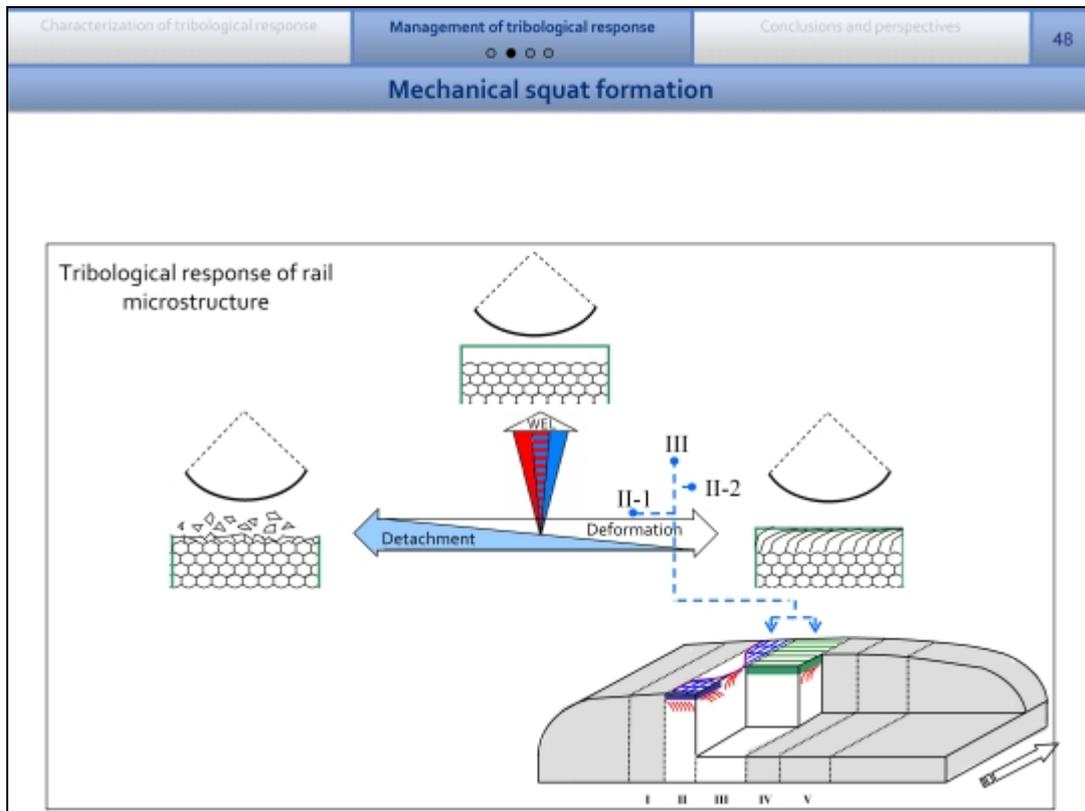
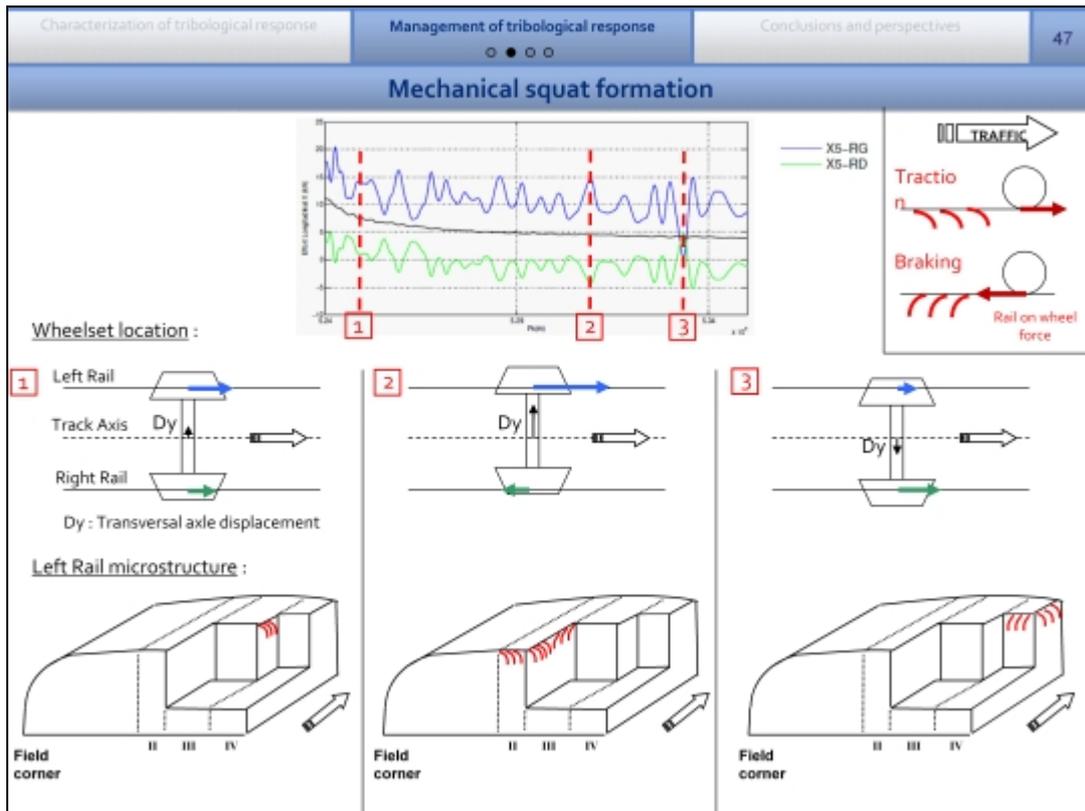


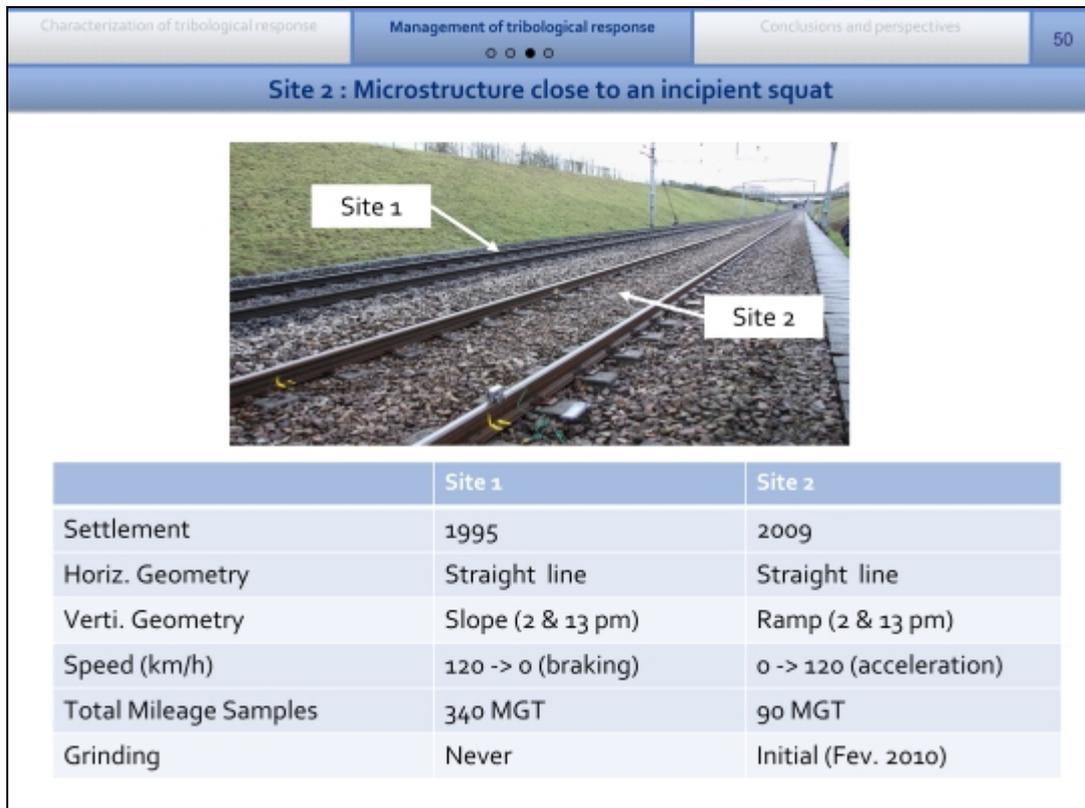
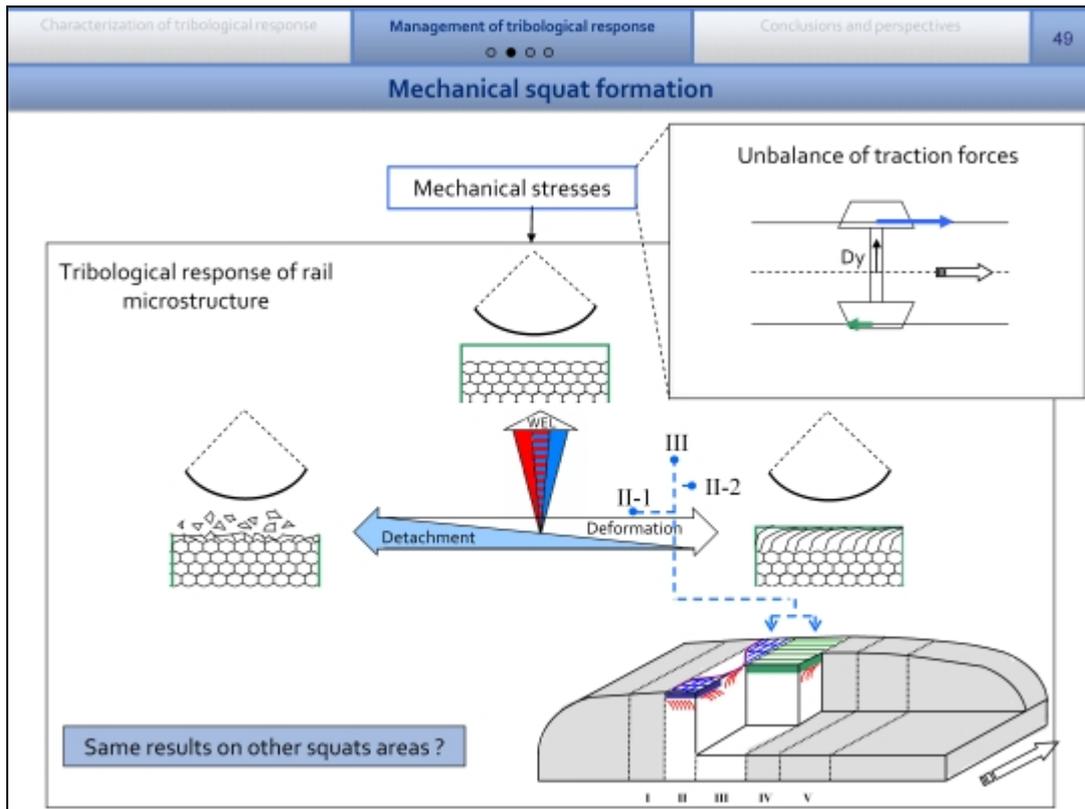
The diagram illustrates a train moving from left to right. At the start of the test, the train is at PK 52400 and moving at $V_{train} = 40 \text{ km/h}$. It then enters a 'Squats area' between PK 52500 and PK 53000. After exiting this area, the train is at PK 53400 and moving at $V_{train} = 100 \text{ km/h}$.







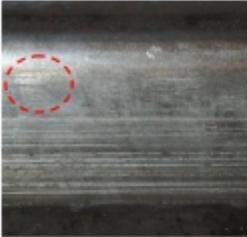




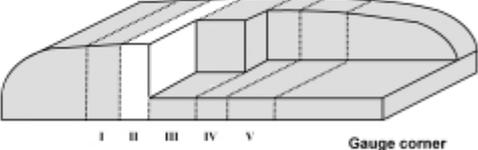
Characterization of tribological response **Management of tribological response** Conclusions and perspectives 51

○ ○ ● ○

Site 2 : Microstructure close to an incipient squat



20 mm



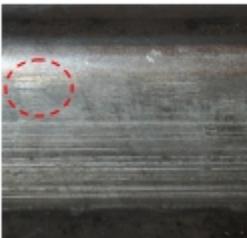
Field corner I II III IV V Gauge corner

■ No observation

Characterization of tribological response **Management of tribological response** Conclusions and perspectives 52

○ ○ ● ○

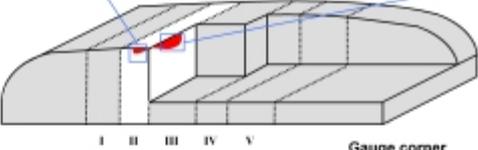
Site 2 : Microstructure close to an incipient squat



20 mm

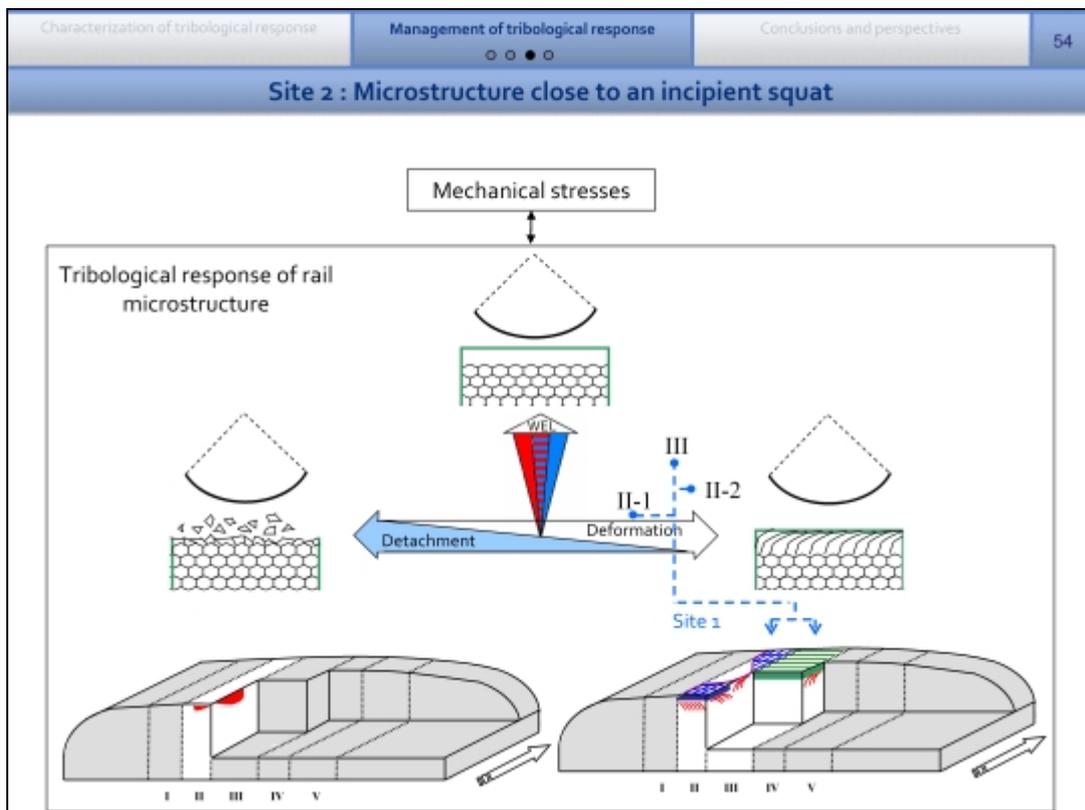
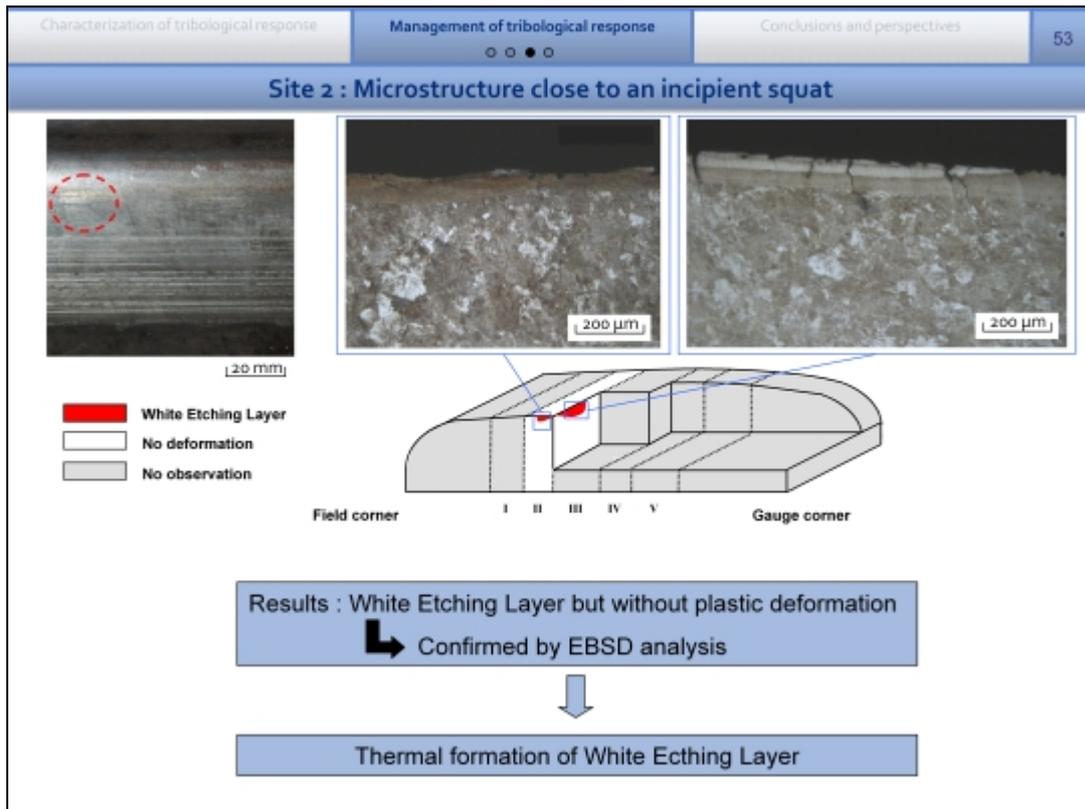


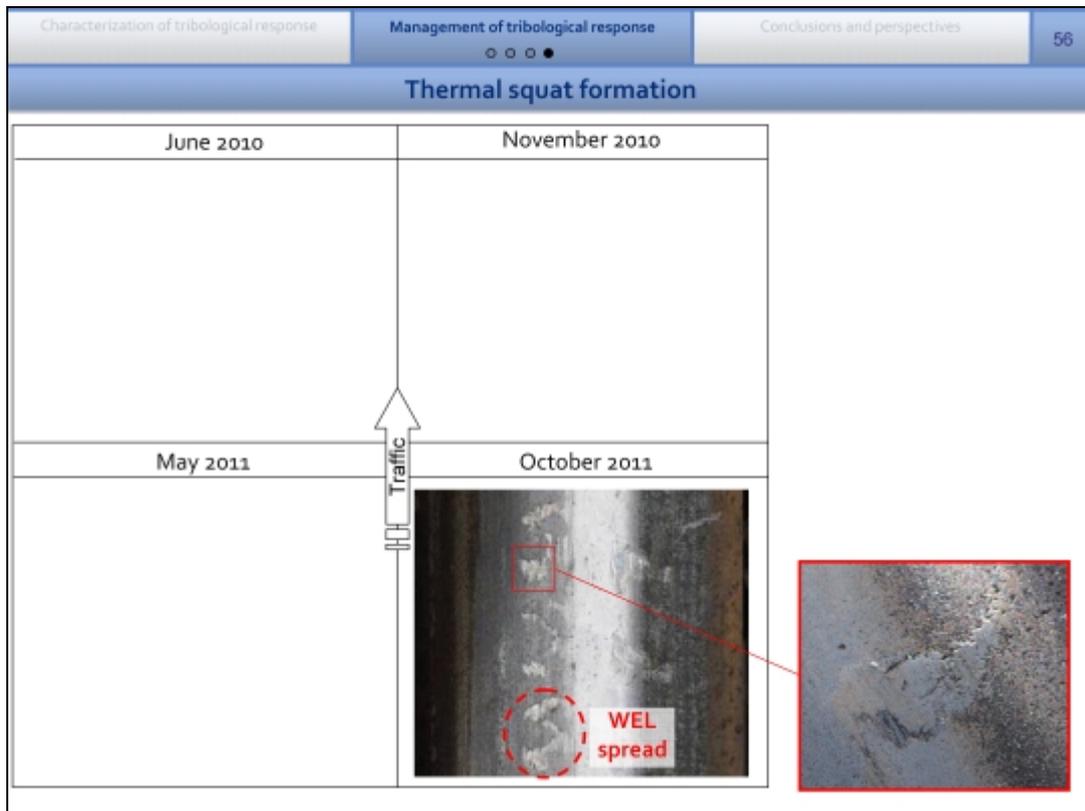
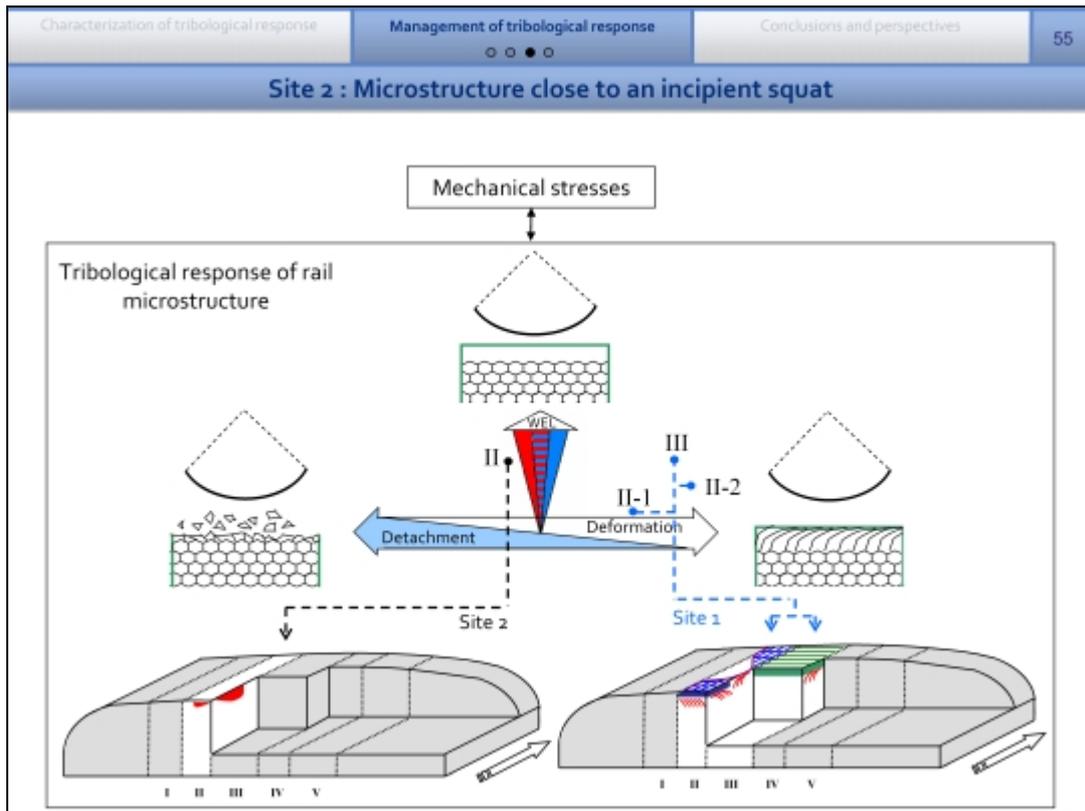
200 μm 200 μm

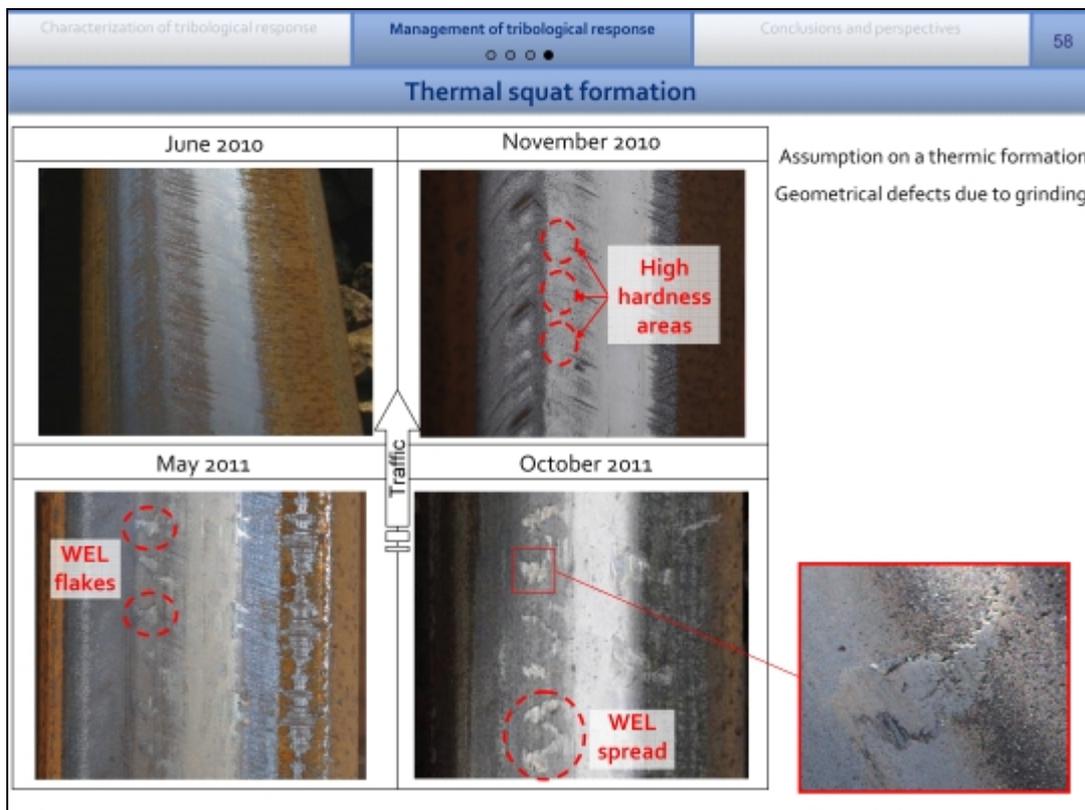
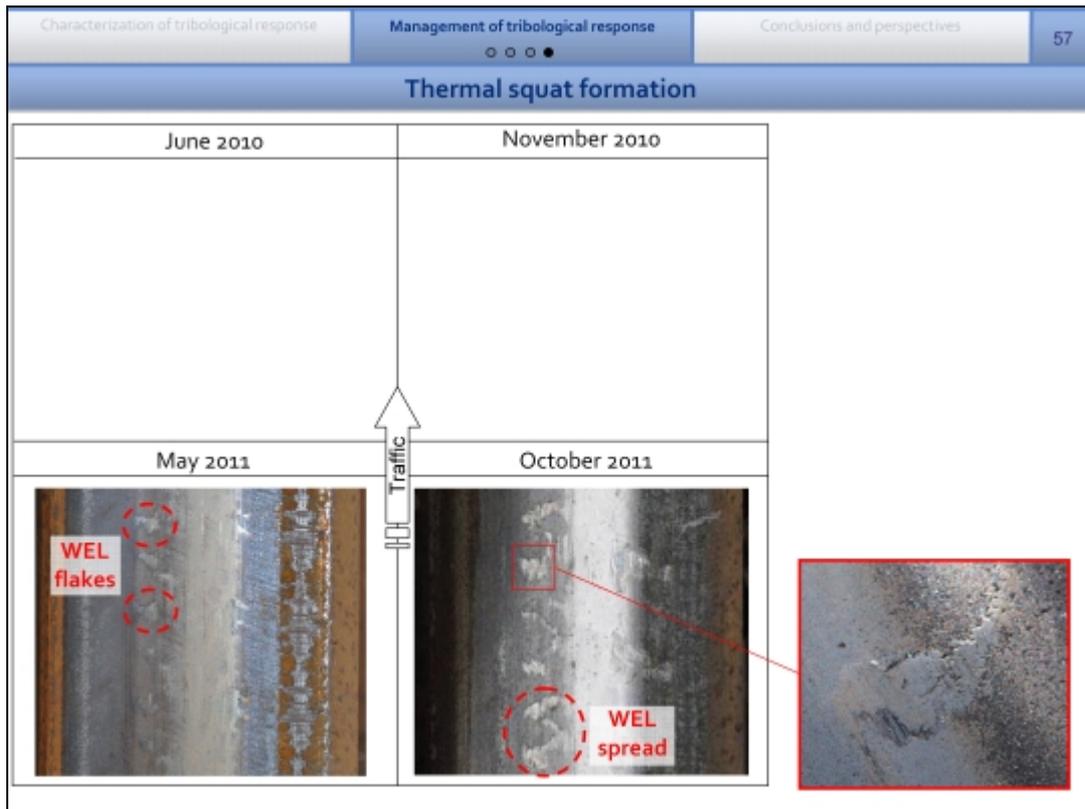


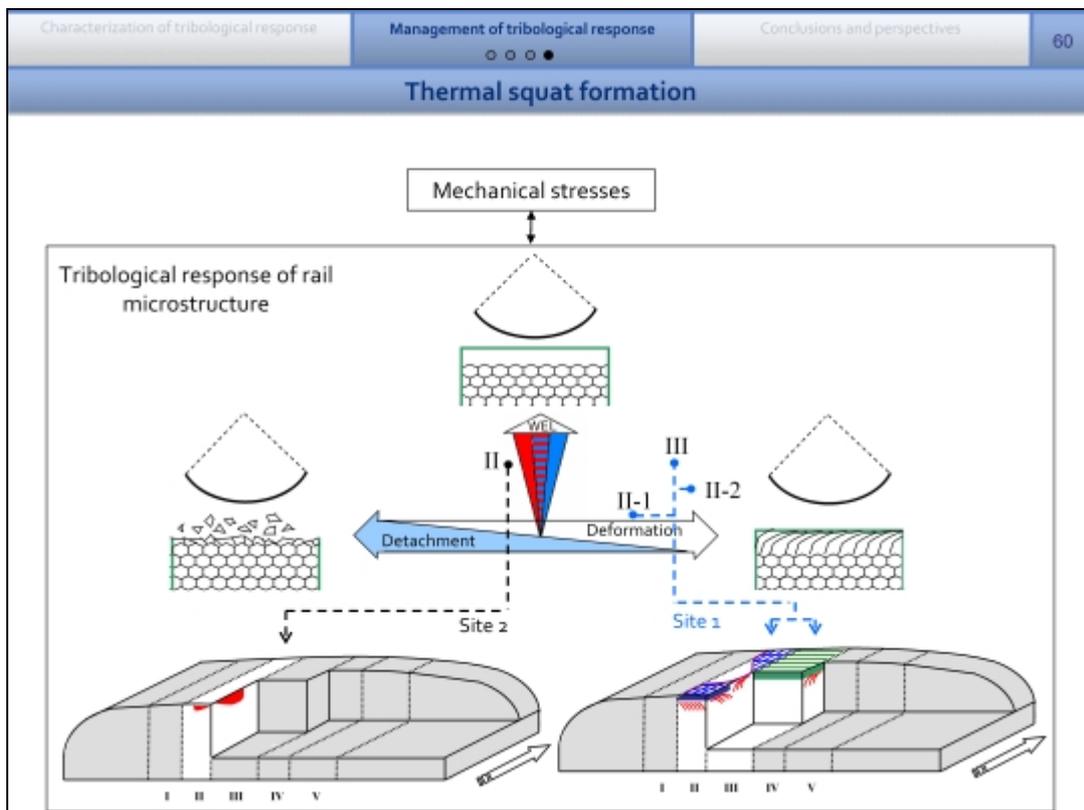
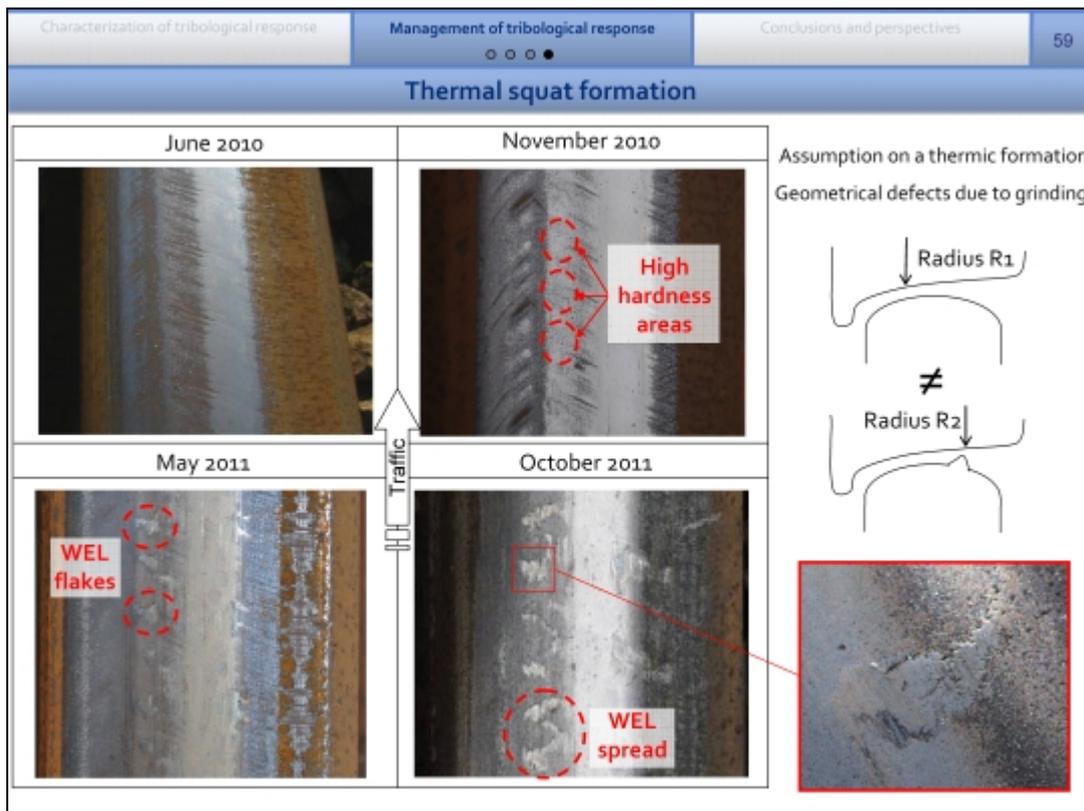
Field corner I II III IV V Gauge corner

■ White Etching Layer
 □ No deformation
 ■ No observation

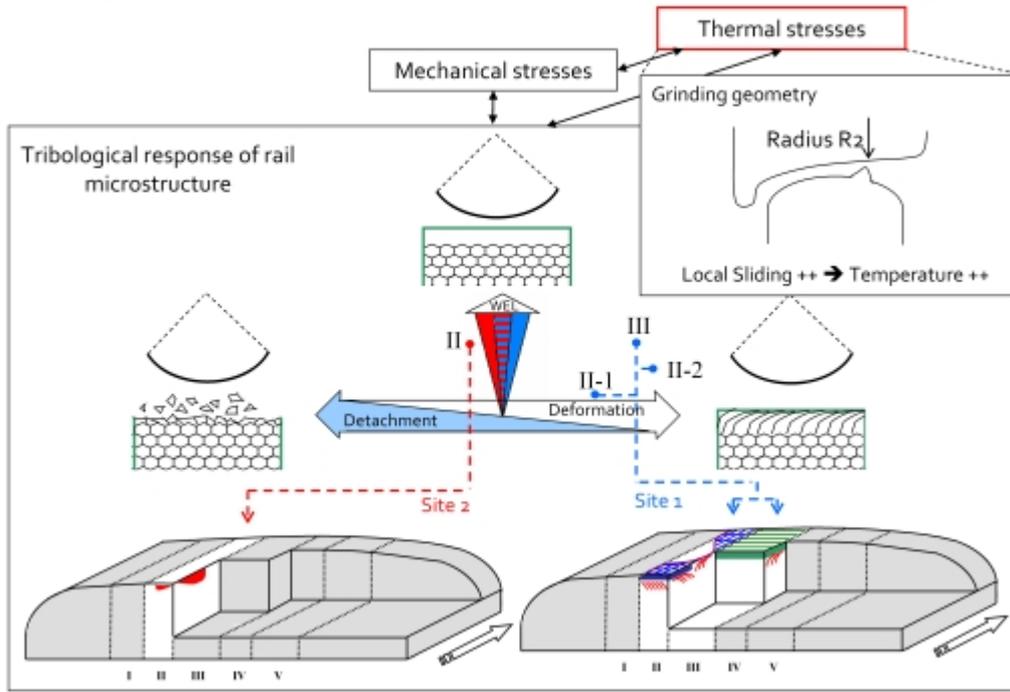




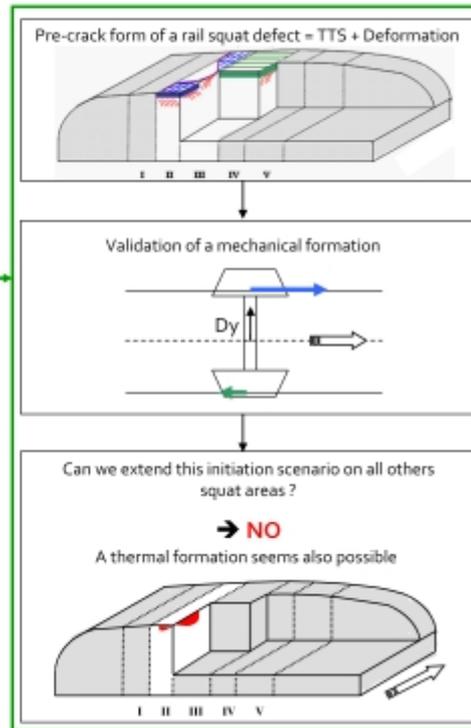
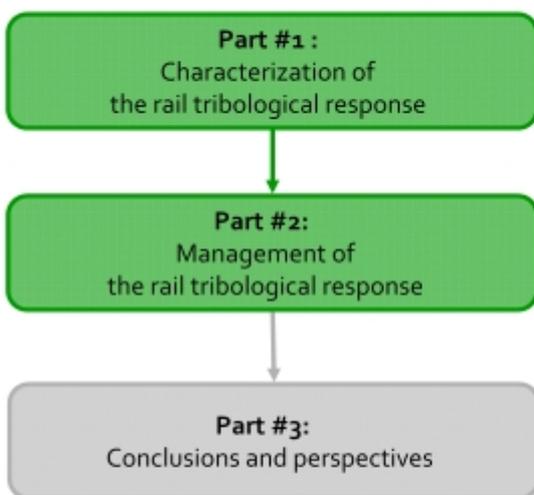


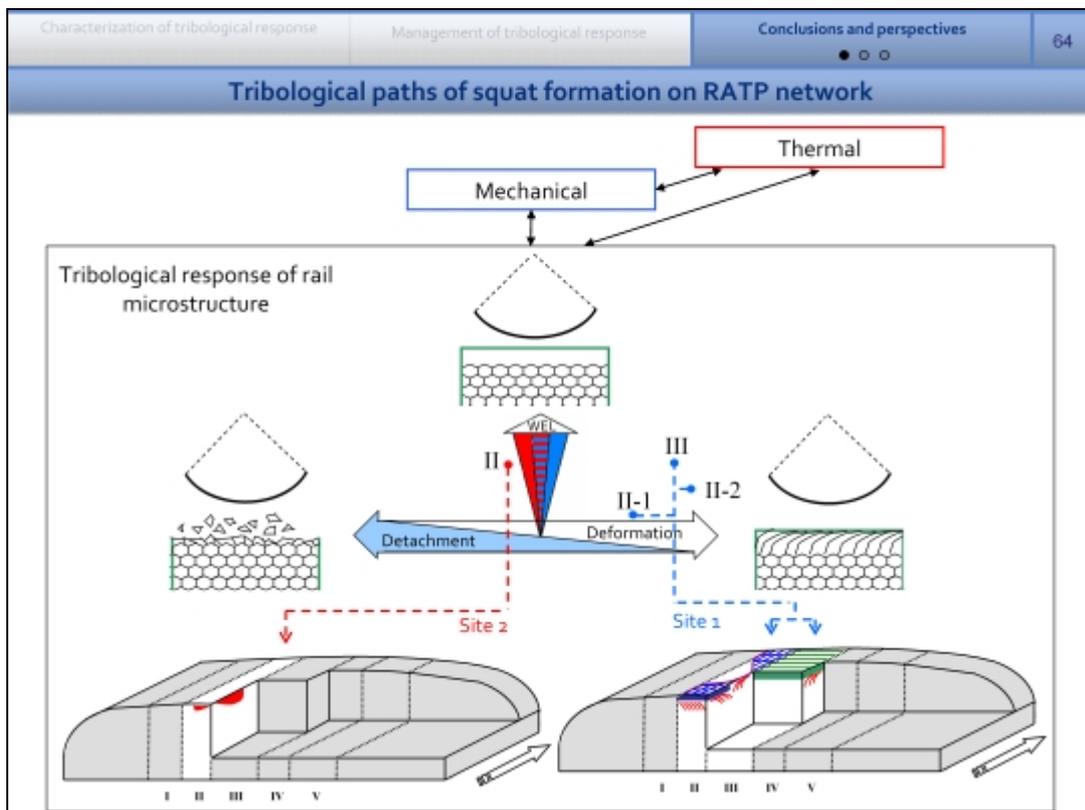
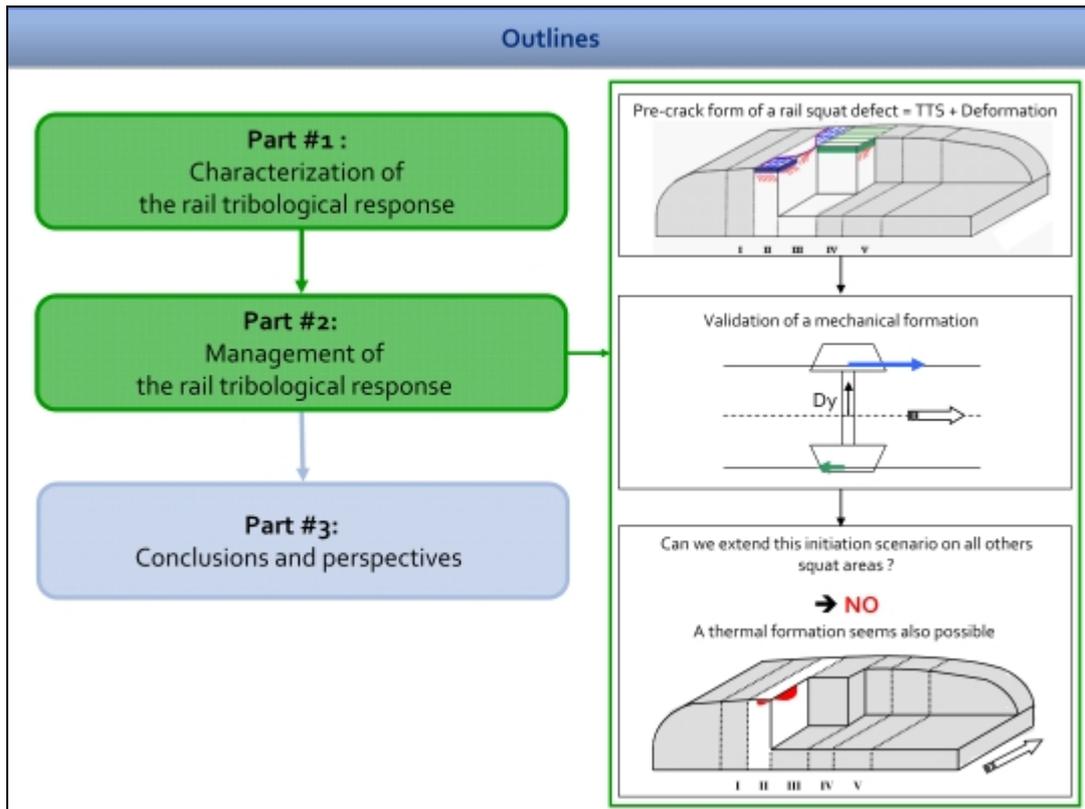


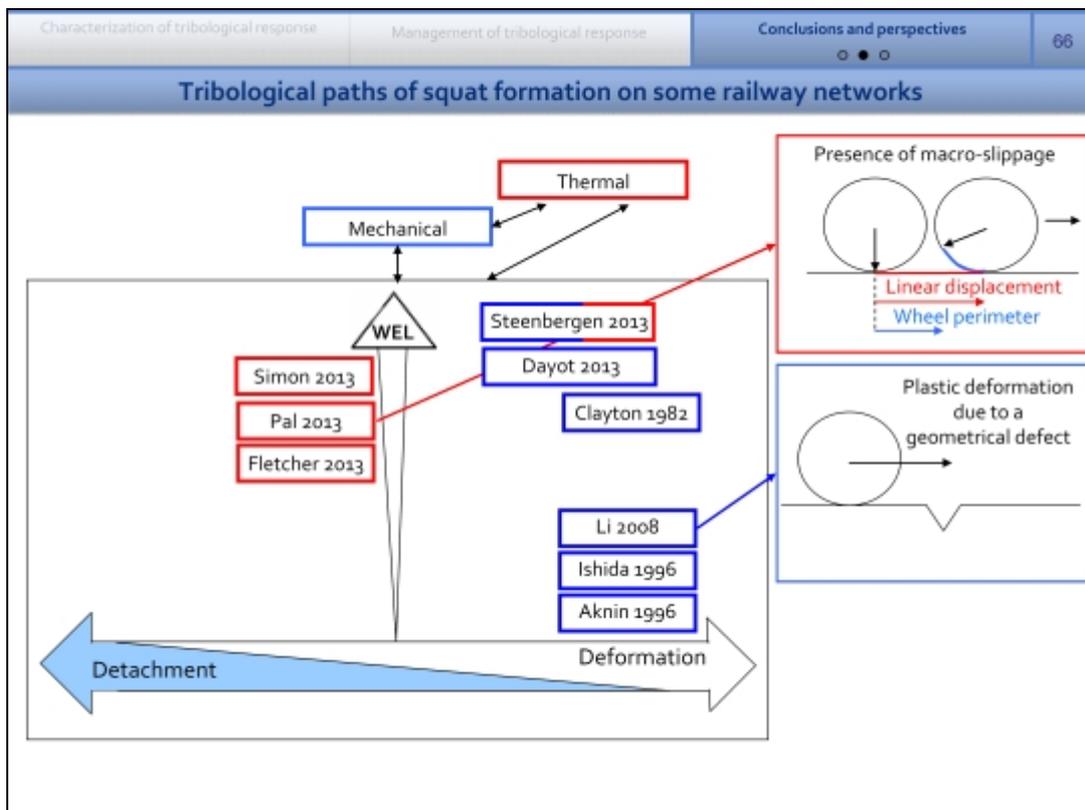
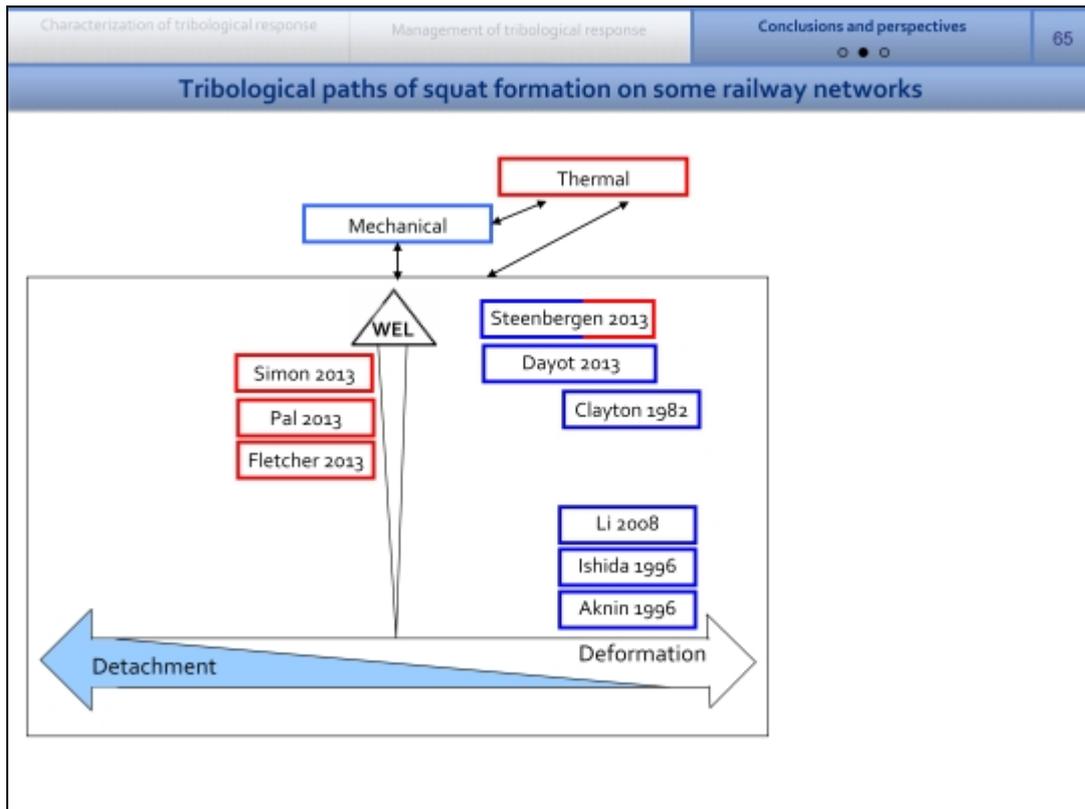
Thermal squat formation

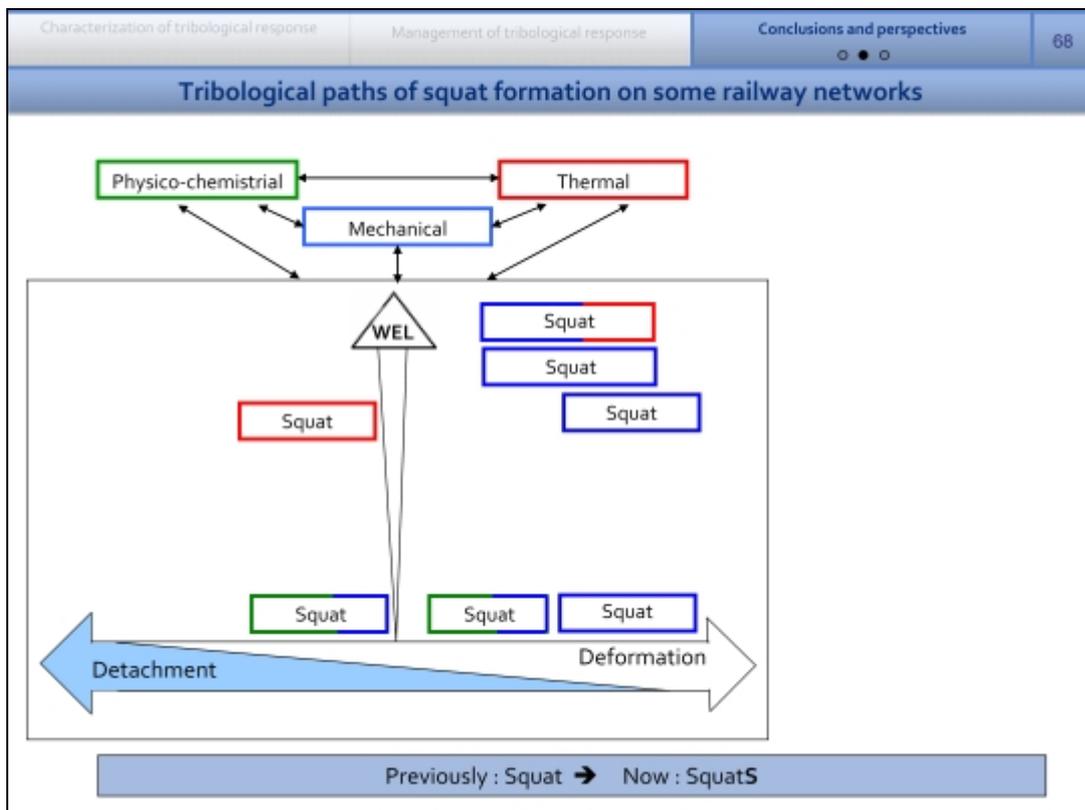
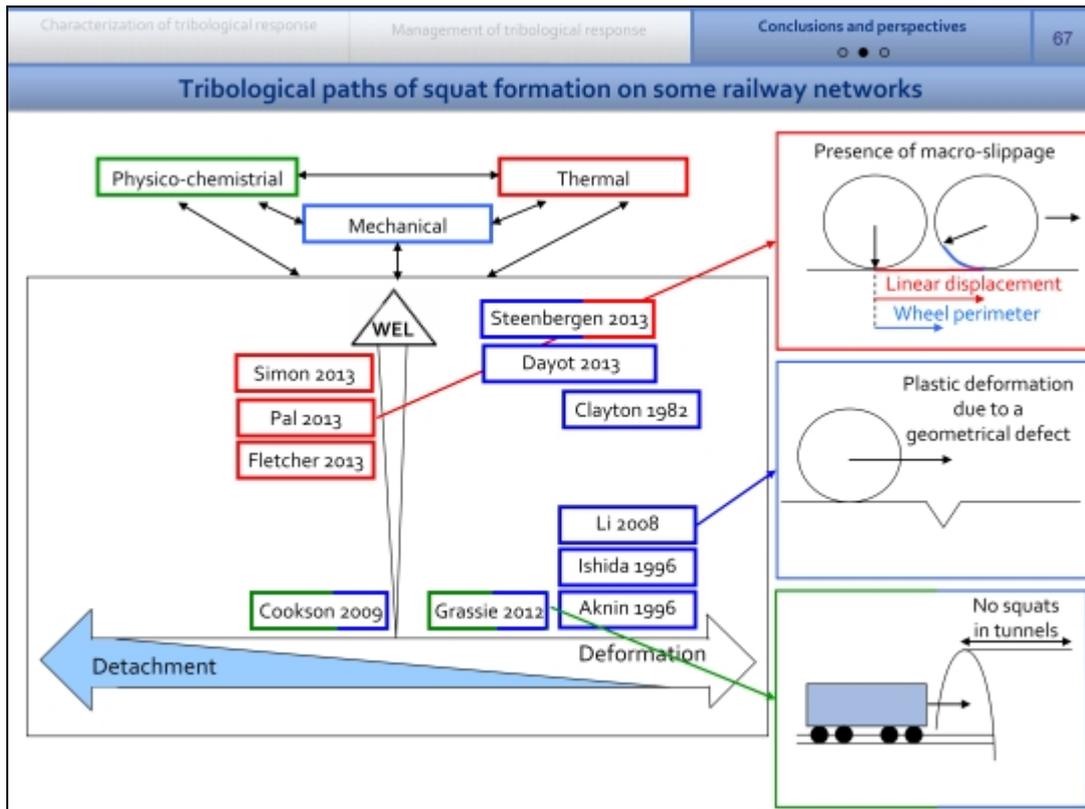


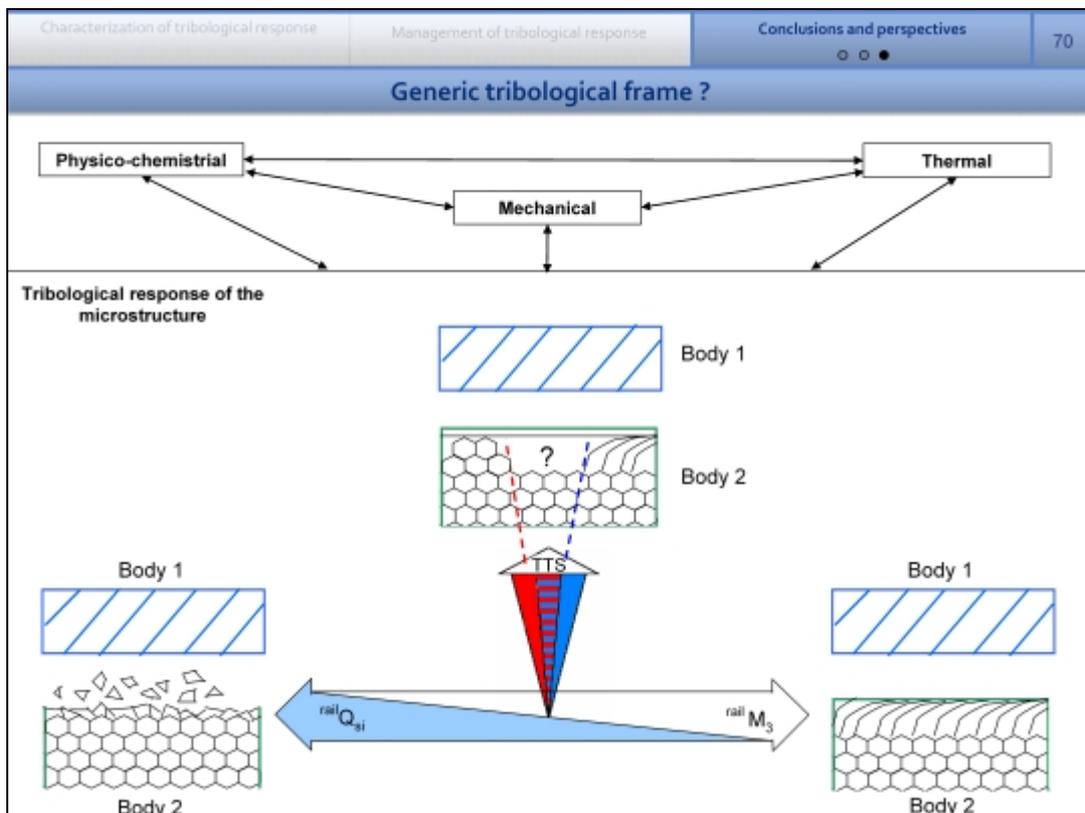
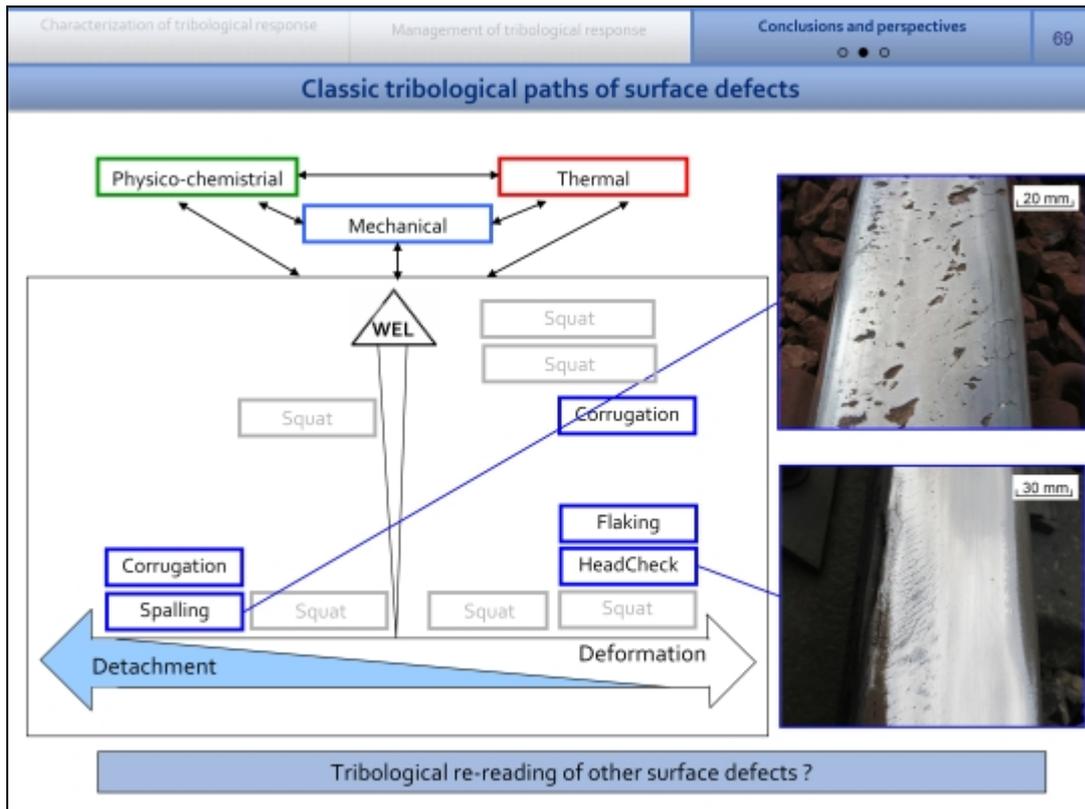
Outlines











Thank you to all the people who made this PhD possible !!



And thank you for your close attention !

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : SIMON (avec précision du nom de jeune fille, le cas échéant)	DATE de SOUTENANCE : 17/03/2014
Prénoms : Samuel, Pierre	
TITRE : De la dynamique ferroviaire à l'accommodation microstructurale du rail - Contribution des TTS à la réponse tribologiques des aciers - - Cas du défaut de squat -	
NATURE : Doctorat	Numéro d'ordre : 2014ISAL0028
Ecole doctorale : MEGA	
Spécialité : Mécanique	
RESUME : Le squat est un défaut de fatigue de contact apparaissant à la surface du rail avant de se propager en profondeur et finissant par mettre en jeu la sûreté ferroviaire. Depuis plusieurs décennies, ce défaut a été l'objet d'études principalement centrées sur les mécanismes de propagation de la fissuration. Les réseaux ferroviaires sont alors contraints de procéder à des opérations coûteuses et répétées d'opérations de remplacements ou d'abrasion mécaniques de la surface des rails. Afin de pallier le manque de connaissances sur les mécanismes d'amorçage du squat, une démarche centrée sur l'analyse tribologique locale de la bande de roulement du rail est mise en œuvre à proximité d'un squat naissant. Cette caractérisation révèle une anisotropie importante des couches superficielles associée aux développements de Transformations Tribologiques Superficielles (TTS), appelées phase blanche. Ces résultats témoignent des conditions de contact particulières dans la zone d'étude, notamment d'un niveau d'effort de cisaillement inhabituel en alignement. Dans le but de valider ces observations, plusieurs essais sont alors effectués. D'une part les conditions de contact dans la zone de squats sont mesurées à partir d'un train instrumenté. Cet essai permet d'identifier un déséquilibre important des efforts de traction sur les bogies moteurs, à même d'induire la microstructure observée précédemment. D'autre part, la réponse tribologique de l'acier à rail aux différentes sollicitations du contact roue rail est étudiée à différentes échelles. A la fois par le suivi régulier pendant 3 ans d'une zone d'essais soumise à la circulation ferroviaire réelle et par l'exploitation de deux essais menés en laboratoire : l'un sur une machine bi-disques de fatigue, l'autre sur une machine appliquant des conditions couplées de pression et de torsion à un corps d'épreuve. L'ensemble de ces essais permet de proposer un schéma global de la réponse tribologique de l'acier à rail. Différents mécanismes d'amorçage du défaut de squat sont alors proposés.	
MOTS-CLES : Contact roue-rail, squat, TTS, phase blanche, dynamique ferroviaire, réponse tribologique, expérimentation	
Laboratoire (s) de recherche : Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides (LaMCos) UMR INSA-CNRS 5514	
Directeurs de thèse:	D.R. Y. BERTHIER Dr A. SAULOT
Président de jury :	Pr. F. LEBON
Composition du jury :	Pr F. LEBON Pr M. NAIT ABDELAZIZ Pr. A. ELEOD Dr Z. LI Pr. P. BELLON Dr X. QUOST Dr A. SAULOT Pr Y. BERTHIER F. FAU S. NIERENGARTEN C. LE SAUX