

# Influence du gradient de microstructure sur les propriétés mécaniques dans un rail du secteur ferroviaire

E. BERTE<sup>a</sup>, F. BARI<sup>a</sup>, J.-F. WITZ<sup>a</sup>, A. EL BARTALI<sup>a</sup>, P. DUFRENOY<sup>a</sup>, E. CHARKALUK<sup>a</sup>

a, LML, FRE CNRS 3723, Cité Scientifique - CS20048, 59651 Villeneuve d'Ascq, France  
[emmanuel.berte@univ-lille1.fr](mailto:emmanuel.berte@univ-lille1.fr)

## Résumé :

*Dans le secteur ferroviaire les sollicitations sévères au contact roue/rail engendrent l'usure et la dégradation prématurée du rail par la fatigue de contact de roulement. Les mécanismes d'endommagement de nature complexe et multi-échelle dépendent en grande partie du mode de sollicitation. Essentiellement deux types d'endommagement, le squat et le head-check, sont présents. Une difficulté majeure dans la compréhension et la modélisation de ces phénomènes est la présence d'une couche superficielle présentant un gradient de microstructure sous la zone de contact qui peut aller de quelques centaines de microns et quelques millimètres, et à partir de laquelle des fissures peuvent s'amorcer et se propager jusqu'à la rupture des composants et particulièrement dans le rail. Le but de cette étude est de quantifier l'influence des gradients de microstructure sur le comportement mécanique du rail en utilisant une technique de corrélation d'images numériques.*

## Abstract:

*In the railway sector severe solicitation at the wheel/rail contact leads to the wear and the degradation of the rail due to rolling contact fatigue. Damage mechanisms, complexes and multi scale, largely depend on loading mode. There are essentially two types of damage the squat and the head-check. A major difficulty for understanding and modelling the behavior and damage of these materials is that a high deformed layer occurs beneath the contact surface. This superficial layer exhibits a microstructural gradient of a few hundred micron to several millimeter in which cracks could be initiate and propagate until the components rupture especially in the rail. The goal of this study is to quantify the influence of microstructural gradient on the mechanical properties of the rail using digital image correlation technique.*

**Mots clefs : Contact roue/rail, Microstructures, Champs cinématiques**

# 1 Introduction

Dans le secteur ferroviaire les sollicitations sévères au contact roue/rail engendrent l'usure et l'endommagement par fatigue du rail et de la roue. La prédiction de la durée de vie et l'optimisation des propriétés mécaniques des organes en contacts (roue et rail), selon le mode de fonctionnement (chargement, topologie...), sont des verrous scientifiques dont la résolution passe par une meilleure compréhension des phénomènes induits à différentes échelles. Les phénomènes de type Squat et Head-check modifient la morphologie, les propriétés mécaniques et la structure cristalline du rail en proche surface [1]. Cette étude se focalise sur les défauts de type Head-check qui est un endommagement dominant en condition de contact courbe et qui se caractérise par une augmentation rapide de la désorientation microstructurale sub-superficielle liée à la déformation plastique de cisaillement dont les profondeurs affectées (jusqu'à quelques millimètres) dépendent de l'historique de chargement [2]. Afin de caractériser l'influence du gradient de la microstructure sur les propriétés mécaniques du rail, plusieurs campagnes d'essais de traction sont menées, sur des éprouvettes extraites de rails de vieillissement différents correspondant à un tonnage défini. Ces essais sont couplés à des mesures de champs cinématique (Corrélation d'Images Numériques) permettant d'accéder, respectivement aux champs de déplacement et de déformation, à une échelle mésoscopique et suivent son évolution au cours de la sollicitation.

## 2 Moyens et méthode expérimentale

### 2.1 Echantillon et préparation

Dans un premier temps, les échantillons à caractériser sont extraits dans les zones plus affectées du rail en acier perlitoferrique R260, soit à 25 mm du congé intérieur du rail. Ce lieu de prélèvement est choisi d'après les analyses microstructurales de Dylewski [2] qui a étudié les mêmes zones dans le cadre du projet (CERVIFER). Les changements microstructuraux (diminution de la taille de grain, désorientation locale importante de la microstructure...) étant très localisés (sur 4-5 mm au maximum) (Fig. 1a), les échantillons d'essais retenus sont de simples parallélépipèdes obtenus par usinage conventionnel (chariotage puis tronçonnage) directement dans le rail (Fig. 1b). Les dimensions des échantillons sont de longueur 60mm, de largeur 10mm et d'épaisseur 2,2mm. Chaque échantillon est ensuite poli mécaniquement (jusqu'à polissage miroir). Les analyses présentées ci-après concernent un échantillon extrait d'un rail de 15 mois de service (~ 85 Méga tonnes de tonnage).

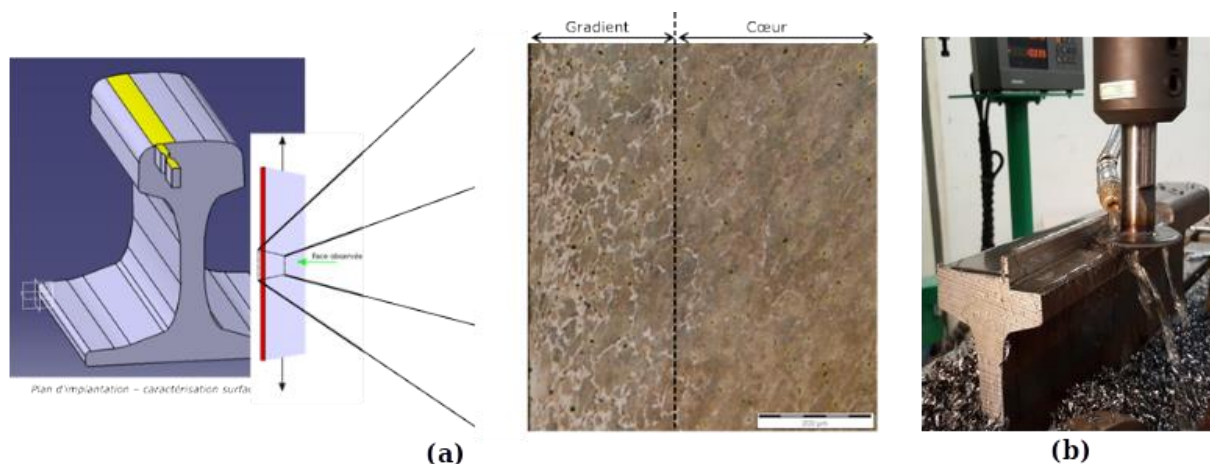


Figure 1: Extraction de l'échantillon dans une zone de head-check, a) zone d'extraction présentant un gradient de microstructure, b) usinage et prélèvement de l'échantillon

Une analyse microstructurale, comparée à celles de Dylewski a permis de montrer que ce choix de « vieillissement » présente un gradient significatif [2]. La micrographie présentée en Fig. 2 montre la microstructure après une attaque au Nital 4 d'un échantillon 15 mois de service. Ces observations montrent que la microstructure est affectée sur une profondeur d'environ 3 mm en proche surface tout en ne mettant pas en évidence d'éventuelles microfissures de fatigue susceptibles de perturber l'essai et fausser les analyses locales.

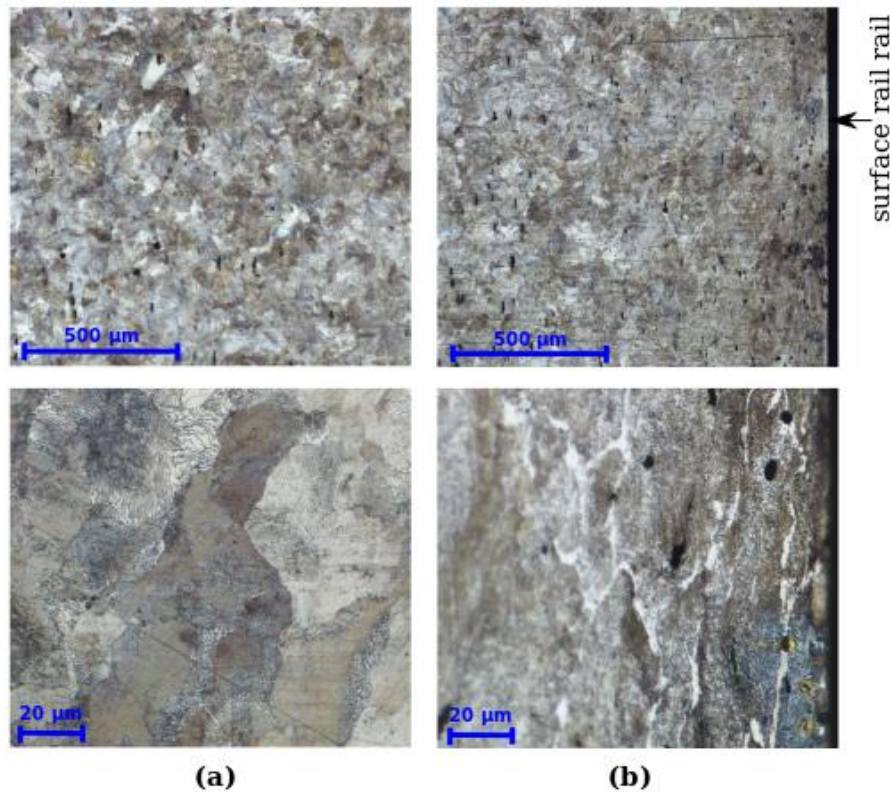


Figure 2 : Micrographies optiques de l'échantillon à 15 mois de service a) à cœur, b) en surface

## 2.2 Procédure expérimentale

L'essai présenté ici est réalisé sur une machine de traction électromécanique de type INSTRON 8800 équipée d'une cellule de charge de 50kN. Des cycles de charge-décharge d'amplitude croissante sont appliqués à l'échantillon (Fig. 3). L'essai est piloté à déplacement imposé (0,011mm/s) avec des limites en charge.

La mesure de champ cinématique à l'échelle mésoscopique est obtenue par la technique de corrélation d'images numériques. Ainsi, un mouchetis de taches noires sur fond blanc est déposé sur la surface polie de l'échantillon à l'aide d'un aérographe. Au cours de l'essai, les images numériques sont acquises grâce à une caméra Ximea 8 bits, dotée d'un capteur de 2048x2048 pixels de résolution, d'une taille 5,5µm/pixel. Un objectif télécentrique G1 permet d'avoir un champ sur une zone d'observation de 11,26x11,26 mm<sup>2</sup> (Fig. 4). Le logiciel YaDICs, développé au laboratoire [5], a été utilisé pour extraire les champs de déplacements et de déformations, avec une résolution spatiale de 55 µm. Il utilise une méthode de recalage basée sur la conservation du flux optique avec pour métrique SSD (Sum Square Difference). Les champs cinématiques utilisent une approche globale avec une transformation de type élastique, avec des éléments à 4 noeuds, optimisés selon la méthode des gradients.

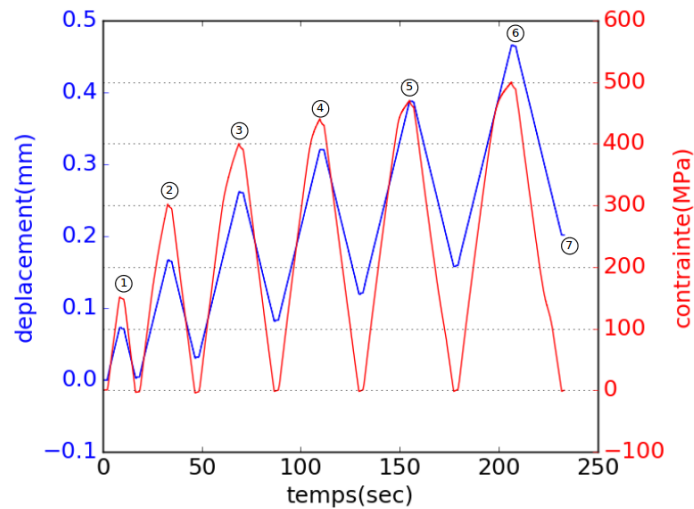


Figure 3: Chargement par paliers, en déplacement imposé, à limite de force et réponse du matériau

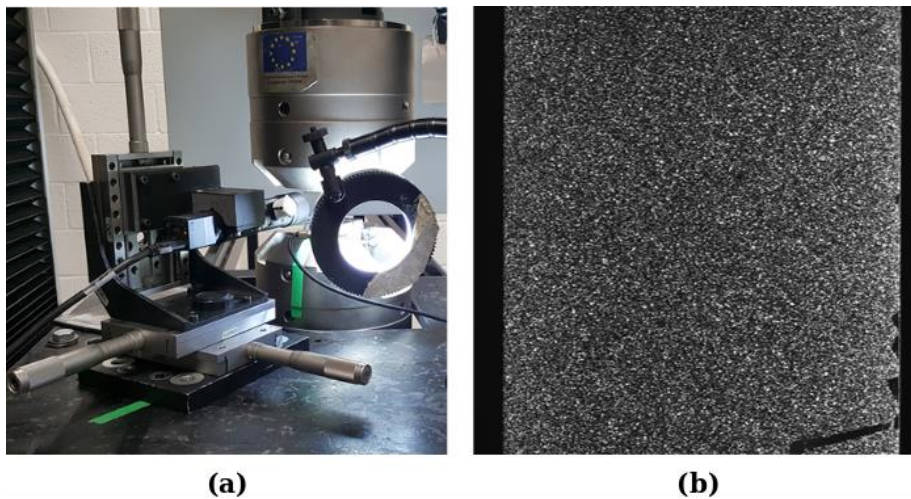


Figure 4: Dispositif expérimental. a) dispositif d'observation in situ d'un échantillon sur une machine de traction par une caméra visible, b) image du mouchetis de la zone analysée de l'échantillon

### 3 Analyses et discussion

La figure 5a montre l'évolution du champ de déformations suivant la direction de sollicitation aux maximums de chargement de chaque cycle (Pic 1 à 6) et après la dernière décharge (7) (les autres cartographies des décharges ne sont pas montrées ici). Afin de quantifier l'influence des gradients de microstructure sur le comportement mécanique du rail, une analyse des déformations moyennes suivant la direction axiale (direction de roulement) depuis la surface jusqu'à 10 mm de profondeur est illustrée en figure 5b.

Ces figures montrent que durant le premier cycle de charge-décharge, le matériau se déforme de façon réversible et homogène sur l'ensemble de la zone observée. Après le troisième cycle, le champ de déformation est hétérogène avec la présence de déformations plus élevées en profondeur. Ces localisations s'intensifient avec la charge. La cartographie à l'instant 7 (fin dernière décharge) montre les déformations plastiques résiduelles dans la zone observée. Les niveaux de déformations sont également plus élevés dans la profondeur.

La figure 5c montre l'évolution de la déformation axiale moyenne de 3 zones de profondeurs différentes au cours du temps (de la sollicitation). La zone 0–3,3 mm correspond à la zone affectée où il y a la présence d'un gradient important de la microstructure. Cette zone se comporte élastiquement puis retrouve une déformation nulle après chaque décharge alors que les deux autres zones se déforment plastiquement avec une accumulation de déformation à chaque cycle charge –décharge. Notons que la déformation de la zone plus à cœur est la plus grande. Ces évolutions traduisent bien un gradient de déformation correspondant à un gradient de propriétés depuis la surface jusqu'en profondeur. L'échantillon extrait dans un rail usé présente un écrouissage important près de la surface de contact, due à des sollicitations très élevées et répétées de compression-cisaillement, combiné à une réduction de la taille de grain et/ou de nodules de perlites, qui a pour conséquence d'augmenter la limite d'élasticité du matériau. Dès lors, cette couche possède une limite élastique bien plus élevée qu'à cœur, avec un comportement élastique réversible à tous les niveaux de sollicitation exercés. Au contraire, à cœur, les niveaux de charge exercés permettent d'atteindre la limite élastique du matériau et induisent des déformations plastiques.

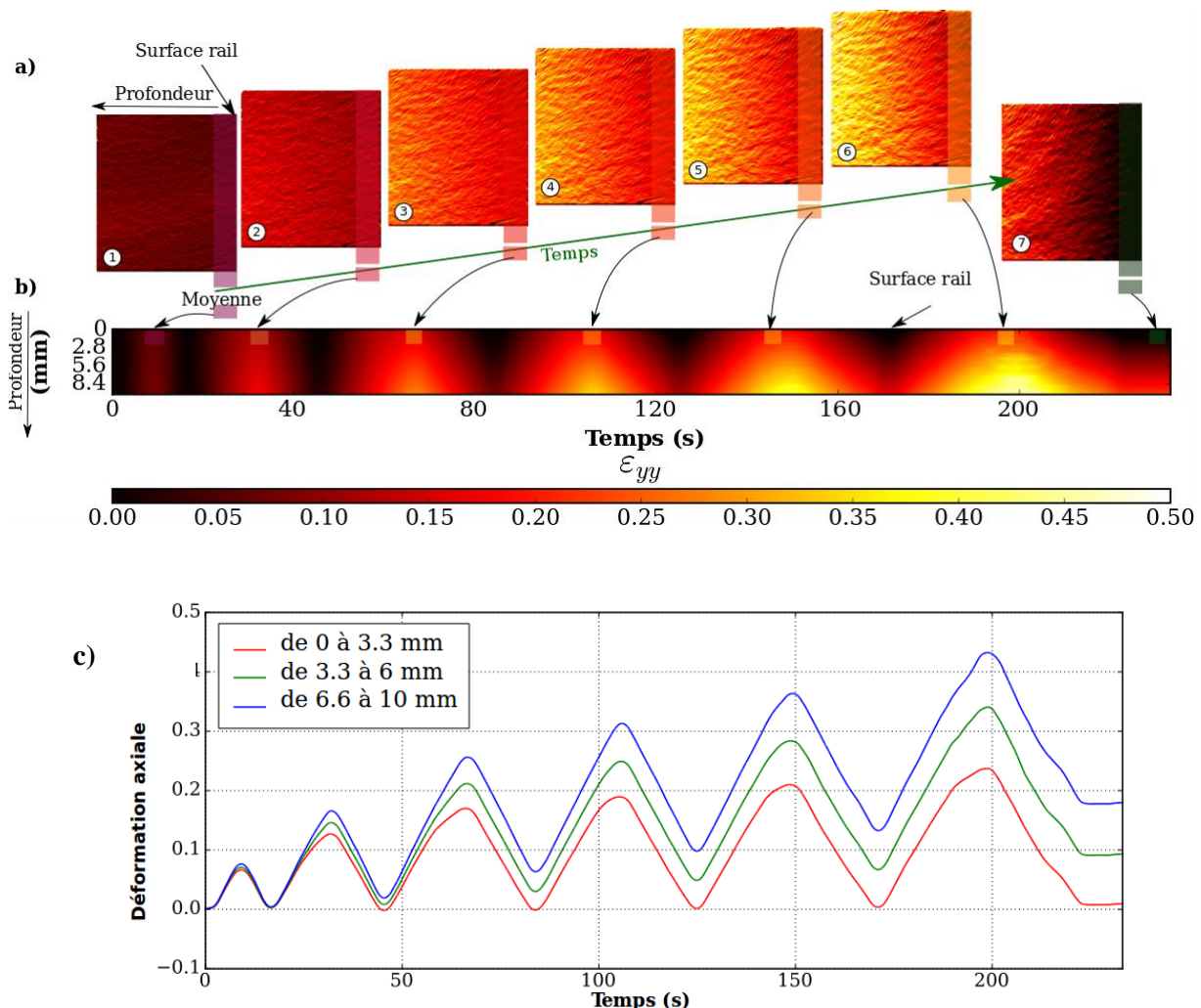


Figure 4: Méthode de caractérisation de l'influence des gradients de microstructure. a) champs de déformations axiales à différents instants, au cours de la sollicitation, repérés sur la figure 1, b) diagramme des déformations moyennes suivant la profondeur du rail, c) évolution de la déformation moyenne de 3 zones depuis la surface jusqu'en profondeur.

Les effets croisés d'écrouissage de la couche de surface se superposent à l'influence de la taille de grain et modification de microstructure qui influencent la limite élastique et les propriétés

d'écrouissage. Même si ces effets doivent être découplés, ces analyses sont en adéquation avec des mesures de champs de déformations effectuées sur des éprouvettes présentant un gradient de taille de grain et dont il a été montré que la localisation s'initie en premier dans les grains de grande taille [4]. Outre le gradient de déformation en profondeur, on peut observer une hétérogénéité des champs de déformation et même une inclinaison de ces champs, qui pourrait correspondre à l'orientation des champs de déformations induit par la sollicitation de cisaillement en proche surface.

## Conclusion

Ce travail propose une méthode d'analyse de l'influence du gradient de microstructure due au contact roue rail sur le comportement mécanique des rails. Les champs de déformations sont mesurés par corrélation d'images numériques dans un échantillon prélevé dans la région la plus sollicitée en service propice à un endommagement de type Head-Check. Ces mesures montrent que le matériau se déforme d'abord en profondeur alors qu'en proche surface il reste élastique pour les niveaux de contrainte atteint. Le matériau étudié est extrait d'un rail après 15 mois de service et donc endommagé. Dû à la sollicitation, le matériau est écroui sur couche superficielle ce qui augmente ses propriétés mécaniques et augmente donc sa limite élastique. La prochaine étape de ce travail est d'une part de corréler plus précisément ces champs de déformation à la cristallographie du matériau en effectuant des analyses EBSD de la surface et d'autre part étudier l'influence du chargement sur différents échantillons avec un tonnage allant de 1 à 17 mois de service. Des analyses fines des hétérogénéités observées pourraient s'avérer également instructives par rapport aux évolutions microstructurales et orientation des champs de déformation induit par la sollicitation de cisaillement sévère près de la surface. In fine des informations quantitatives de comportement pourraient être extraites.

## Remerciements

Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet CERVIFER. Les auteurs remercient l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), la région Hauts de France, l'ensemble des acteurs du projet ainsi que la RATP qui a provisionné le matériau.

## Références

- [1] R. Dollevoet, Design of Anti Head Check based on stress relief, Phd Thesis, University of Twente (Netherlands), 2010.
- [2] B. Dylewski, Caractérisation expérimentale multi-échelles et multi-techniques du rail en service - De la déformation plastique sévère et des évolutions de microstructure à l'amorçage de fissures par Fatigue de Contact de Roulement, Thèse de Doctorat, UTC Compiègne, 2016,
- [3] R. Seghir, J.-F. Witz, S. Coudert, YaDICS - Digital Image Correlation 2/3D software, 2014. <http://yadics.univ-lille1.fr>
- [4] P. Baudoin, Caractérisation et identification de propriétés de matériaux métalliques à gradients de microstructure. Thèse de doctorat, 2015, Université de Lille 1