



**HAL**  
open science

## Micro machine de fatigue pour contact hertzien rugueux

L. Berthe, Philippe Sainsot, Marie-Christine Baietto, Antonius Lubrecht,  
Mathilde Meheux

### ► To cite this version:

L. Berthe, Philippe Sainsot, Marie-Christine Baietto, Antonius Lubrecht, Mathilde Meheux. Micro machine de fatigue pour contact hertzien rugueux. 31ème Journées de Printemps - Sté. Française de Métallurgie et de Matériaux, May 2012, Paris, France, France. pp.1-8. hal-01004288

**HAL Id: hal-01004288**

**<https://hal.science/hal-01004288>**

Submitted on 11 Jun 2014

**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.

# MICRO MACHINE DE FATIGUE POUR CONTACT HERTZIEN RUGUEUX

L. BERTHE\* , P. SAINSOT\* , M.C. BAIETTO\* ,  
A.A. LUBRECHT\* , M. MEHEUX\*\*

\* Université de Lyon, CNRS  
INSA-Lyon, LaMCoS UMR5259, F-69621, France  
\*\* ASCOMETAL CREAS, 57301 Hagondange, France

## 1 INTRODUCTION

La tenue des surfaces des contacts rugueux lubrifiés est un problème crucial dans l'évaluation de la durée de vie des mécanismes, durée de vie conditionnée dès les premiers cycles par le rodage puis par les mécanismes de fatigue des surfaces.

La difficulté de ce type d'analyse est liée à la réalisation d'un suivi en continu de l'évolution de l'état de surface du contact à une échelle suffisamment fine et précise. En effet, les machines bi-disques existantes permettent en général une étude du comportement global du contact (chargement macroscopique normal et tangentiel) mais nécessitant un démontage à chaque observation de l'ensemble du système. En outre, les temps expérimentaux et le coût des essais sont élevés, l'observation des surfaces s'effectuant essentiellement en fin d'essai.

Les objectifs de ce travail sont de comprendre et de pouvoir prédire les mécanismes de fatigue. Afin d'atteindre ces objectifs tout en se libérant des contraintes, il a été mis en place une méthodologie combinant essais et simulations, dans le but d'identifier les mécanismes de rodage et de dégradation, de comprendre leurs interactions éventuelles et d'aboutir à une approche prédictive de l'endommagement.

Une micro machine à galets, appelée couramment  $\mu Mag$  et développée au sein du LaMCoS, a été spécialement conçue pour ce type d'analyse. Elle permet l'observation in situ des surfaces des galets en contact, lors de l'interruption de l'essai. La petite taille de la machine évite de démonter l'ensemble mobile, cause de perturbations et d'imprécisions. Ce dispositif d'essai offre un contrôle précis et continu des paramètres cinématiques et de chargement.

## 2 La $\mu MaG$

Les éléments essentiels du cahier des charges de la  $\mu MaG$  pour l'analyse du contact Hertzien entre deux galets sont (i) simulation précise, (ii) mise en

oeuvre aisée et (iii) coût faible. Sa taille a ainsi été dimensionnée pour une observation aisée et régulière des galets sans démontage au cours d'un essai.

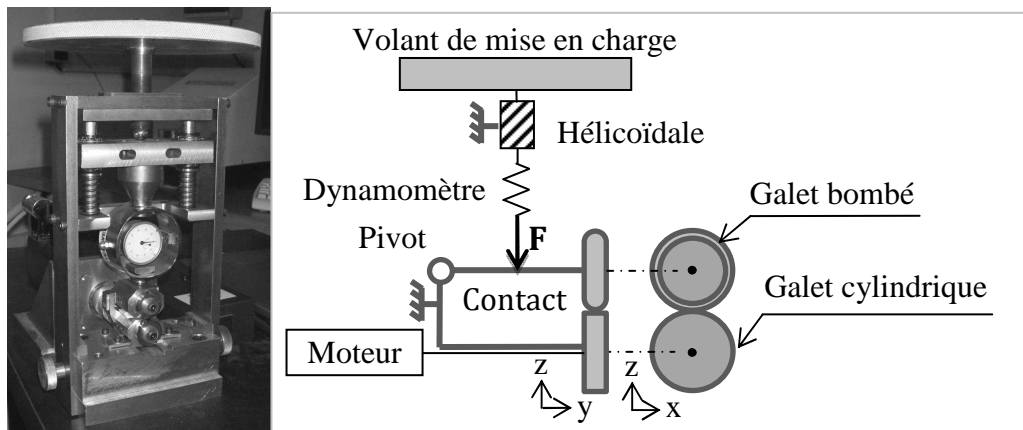


Figure 1. Photographie et schéma de fonctionnement de la  $\mu$ MaG.

Les parties les plus imposantes sont le système de mise en charge et le moteur. Le servomoteur KSY 268 34 D-R4/230 est piloté par logiciel et sa vitesse de rotation maximum est 2 000 tr/min. Un capteur lui est associé d'une précision de 65535 points par tours.

Le système de mise en charge est inspiré de celui du dispositif d'essai de traction/compression. Il se compose d'un volant, une vis, de colonnes de guidage et pour la mesure de la force appliquée d'un anneau dynamométrique.

Le carter du galet inférieur, correspondant à un galet cylindrique, est fixé au bâti et l'axe galet est entraîné par le moteur. Il est également en liaison pivot avec le carter du galet supérieur, correspondant à un galet bombé, qui est lui-même soumis à la force de mise en charge.

L'ensemble carters inférieur et supérieur est dissociable de la machine à galets tout en maintenant le contact entre les deux galets.

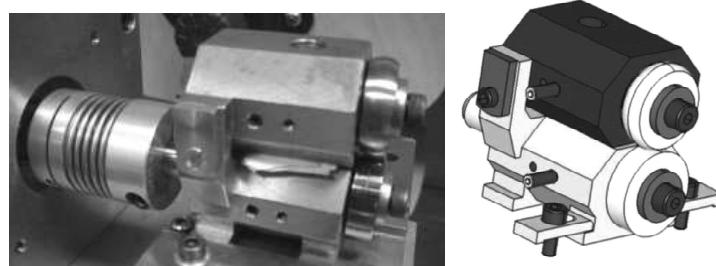


Figure 2. Carters inférieur et supérieur.

Les galets bombés et cylindriques sont usinés par ASCOMETAL CREAS. Les surfaces sont rectifiées par Microrectif. Les matériaux, la méthode d'usinage et la rugosité des surfaces sont connus et sont des paramètres maîtrisés, variables en fonction des essais.

Les galets cylindriques sont des galets dits lisses. Ils sont polis en fonction de la rugosité voulue. La rugosité des galets bombés, plus importante (d'un facteur dix), est due aux stries d'usinage. Ces dernières peuvent être hélicoïdales ou parallèles, ce qui est également un paramètre d'essai.

### 3 PROTOCLE DE MESURE ET EXPLOITATION DES RESULTATS

#### *Marquage des galets*

Le marquage des galets est essentiel pour repérer les surfaces observées et effectuer un positionnement précis et reproductible, tour après tour.

Les dimensions des surfaces mesurées sont  $250\mu\text{m} \times 1\text{mm}$  pour une largeur axiale de galet de 7mm. Deux systèmes de marquage sont nécessaires : un marquage dit grossier (macro) et un marquage dit fin (micro).

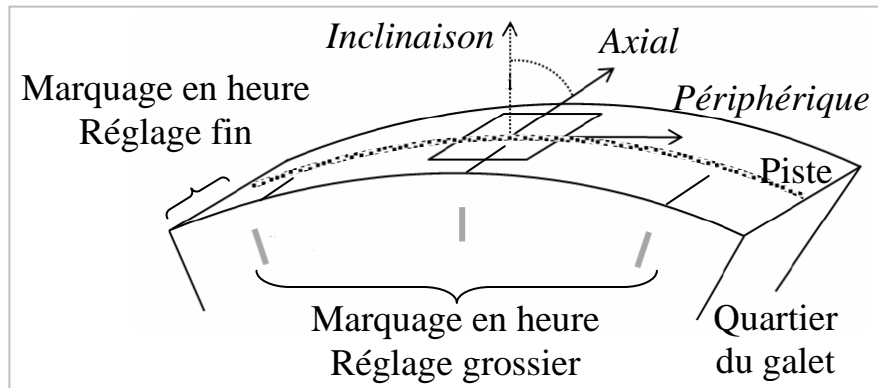


Figure 3. Schéma des marquages des galets.

Tous les galets ont un marquage grossier qui consiste en douze traits sur la surface plane. Cela permet un repérage à l'aide des heures et minutes (comme sur une montre analogique) suivant la direction périphérique.

Le marquage fin est réalisé en continuité sur la surface de contact des galets. Il permet un repérage sous le microscope d'un rugosimètre optique et assure un positionnement le long de la direction périphérique au dixième de micromètre.

Enfin, la position axiale est déterminée facilement. En effet, le galet bombé touche la piste du galet cylindrique exactement au milieu de sa largeur (à la tolérance d'usinage près).

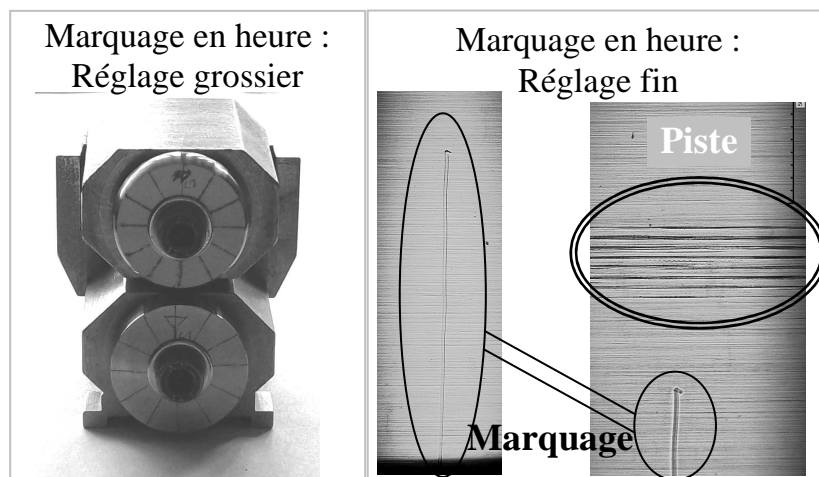


Figure 4. Photographies des marquages des galets.

## ***Outils de mesures expérimentales***

A l'aide d'un microscope optique, des images en couleurs à la fois nettes sur les hauteurs et dans les profondeurs du relief, sont capturées. Le grossissement du microscope est progressivement variable et permet de retrouver les repères plus facilement. Ces images nous permettront de suivre l'évolution de l'usure de la piste.

Le microscope optique utilisé nous permet également de parcourir la piste du galet en prenant plusieurs images qui sont automatiquement recollées pour créer une image panoramique (Figure 5 à droite).

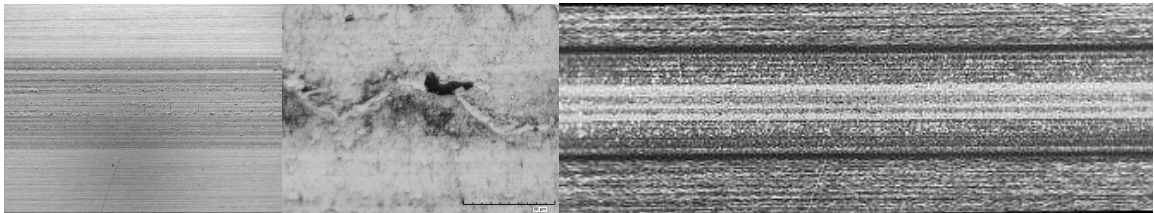


Figure 5. Images obtenues avec un microscope optique

## ***Extraction et traitement de profil de surface***

Le relevé de la topographie de surface est effectué avec le rugosimètre optique avec un objectif optique x50. Par conséquent, la surface obtenue ne couvre pas la totalité de la piste. Plusieurs images sont capturées dans le sens axial et sont ensuite *recollées* automatiquement ou manuellement.

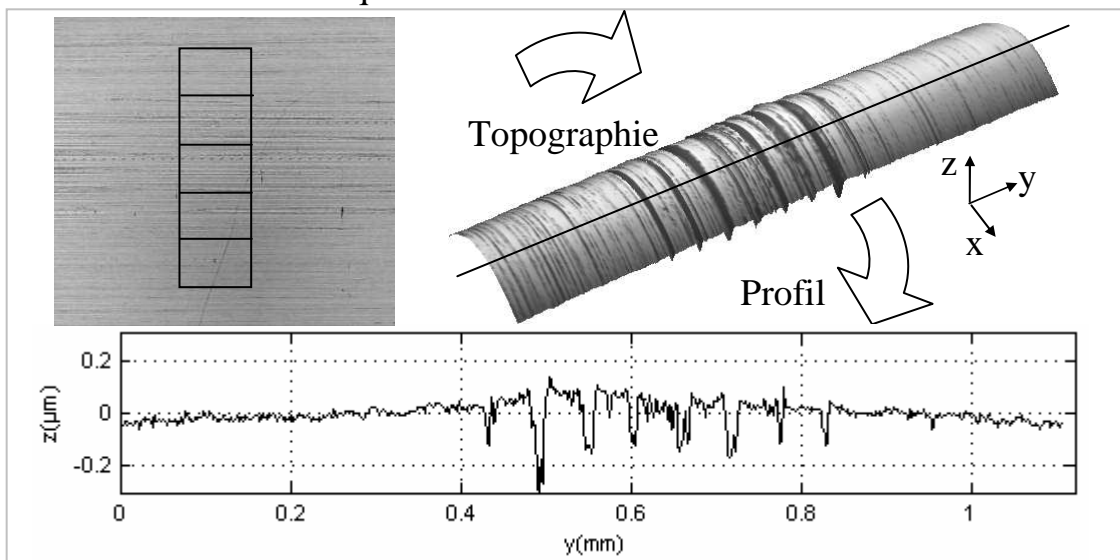


Figure 6. Extraction de topographie et de profil.

La surface est exportée sous logiciel afin d'en extraire les profils. La comparaison de deux profils successifs à deux instants de l'essai nécessite un calage préalable par rapport à un défaut de surface de taille nanométrique. Les profils peuvent être retravaillés afin, par exemple, d'en soustraire la courbure circulaire des galets pour une mise en évidence des résultats, comme l'évolution de la rugosité.

## ***Outils numériques et analytiques***

La méthode de marquage présentée ci-dessus permet d'extraire très précisément un profil au même site à chaque mesure. Ceci est essentiel notamment pour le suivi de l'évolution des profils lors des premiers cycles où le rodage des surfaces s'effectue. Les relevés expérimentaux des topographies de surfaces à la fin du rodage pourront ainsi être comparées à celles obtenues par des simulations numériques élasto- plastiques [1]. Ainsi pour l'étude des mécanismes de rodage et de fatigue des surfaces, les calculs de contraintes dans le contact seront effectués par des outils analytiques [2] et numériques [3] existants.

## **4 EXEMPLE DE RESULTATS**

### ***Caractérisation des galets et de l'essai***

Les propriétés des galets utilisés dans cet essai sont définies dans le tableau I.

Tableau I. Caractérisation des galets lisse et rugueux.

<b>Galet</b>	<b>Rx (mm)</b>	<b>Ry (mm)</b>	<b>Ri (mm)</b>	<b>Largeur (mm)</b>	<b>Rugosité (Ra)</b>	<b>Etat de surface</b>
<b>Lisse</b>	12,5	Infini	10	7	10 nm	Polie
<b>Rugueux</b>	12,5	6,25	10	7	0,6 $\mu\text{m}$	Stries hélicoïdales

Le matériau utilisé est un acier 100C6. Une pression de contact de 2GPa est appliquée. Lors de chaque relevé indiqué dans le tableau II, l'essai est arrêté, des relevés de rugosité sont réalisés sans démonter l'ensemble support des galets. La mise en charge et la décharge sont réalisées progressivement sur 2 tours à 10 tr/min.

Tableau II. Caractérisation de l'essai.

<b>Nombre de cycles</b>	1	10	20	100	1000	2000	10000	100000
<b>Vitesse de rotation (tr/min)</b>	1	1	1	10	20	20	50	250
De 100 000 cycles à 1 000 000 cycles par pas de 100 000 cycles à 300tr/min avec une goutte d'huile PAO sans additif.								

### ***Profil***

Pour chaque arrêt, la topographie de la surface est mesurée et un profil est extrait, situé précisément toujours au même endroit.

#### ***Le galet lisse :***

Le premier profil correspond au galet vierge. Il présente une rugosité d'environ 10nm. Sur le deuxième profil réalisé après seulement un tour, les points d'appuis du galet rugueux sur le galet lisse sont nettement visibles.

L'espacement des creux du profil correspond exactement à la période du galet rugueux.

Sur les profils obtenus après 10, 20 et 100 cycles, les empreintes du galet rugueux sont encore distinctes. A 10 cycles, on observe une stabilisation de la déformation surfacique, considérée comme la fin du rodage. Au bout de 2000 cycles, le balayage des stries du galet rugueux sur le galet lisse, dû notamment à une différence de périmètre entre les deux galets de  $30\mu\text{m}$  et aux stries hélicoïdales du galet rugueux, est effectif.

Ensuite, la surface évolue tout en gardant une rugosité plus ou moins constante jusqu'à 100 000 cycles. De 100 000 cycles à 1 000 000 million de cycles, la rugosité n'évolue pas singulièrement. Néanmoins, l'apparition de creux d'amplitude pouvant aller jusqu'à  $2\mu\text{m}$  à partir de 500 000 cycles a été observée sur d'autres profils. Ceci est dû à la non homogénéité de la dégradation de la surface. Ce phénomène continue jusqu'à une forte dégradation de la surface à un million de cycles.

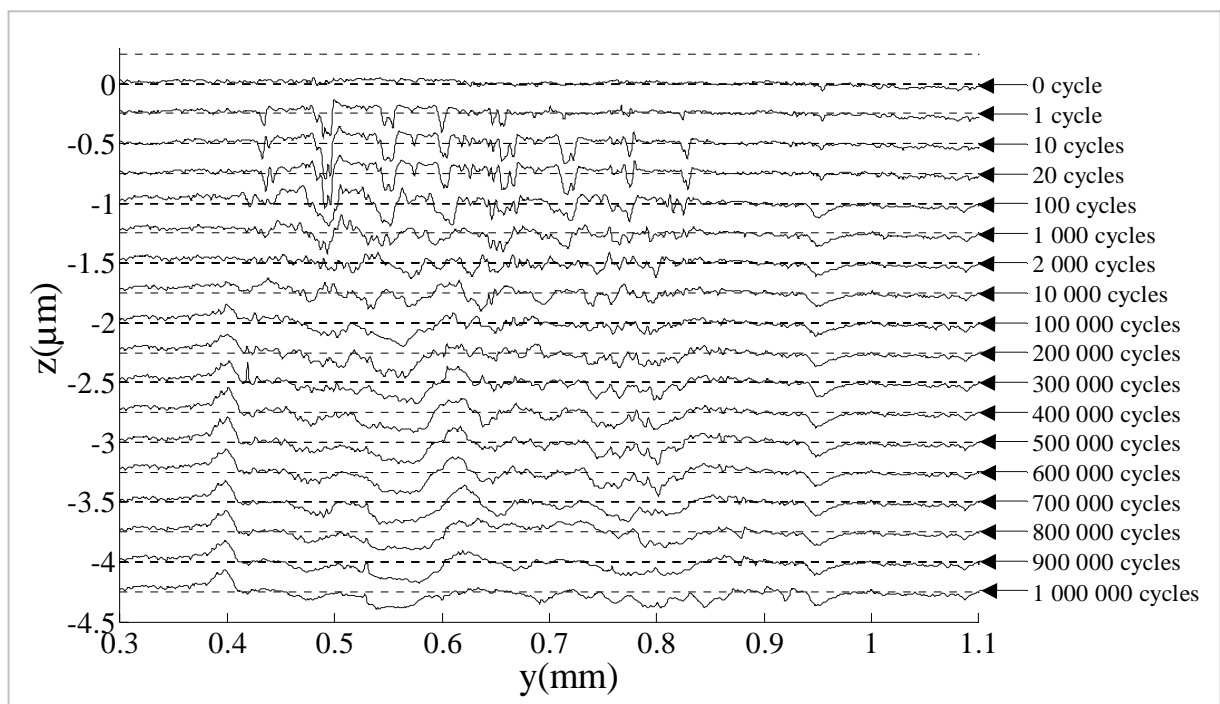


Figure7. Profils de rugosité d'un galet lisse, valeur moyenne suivant  $z$  décalée de  $-0.25\mu\text{m}$  à chaque cyclage.

#### *Le galet rugueux :*

De manière analogue, le galet rugueux est observé. Les commentaires sont inversés. En effet, la rugosité diminue et les stries sont aplanies avec l'augmentation du nombre de cycles.

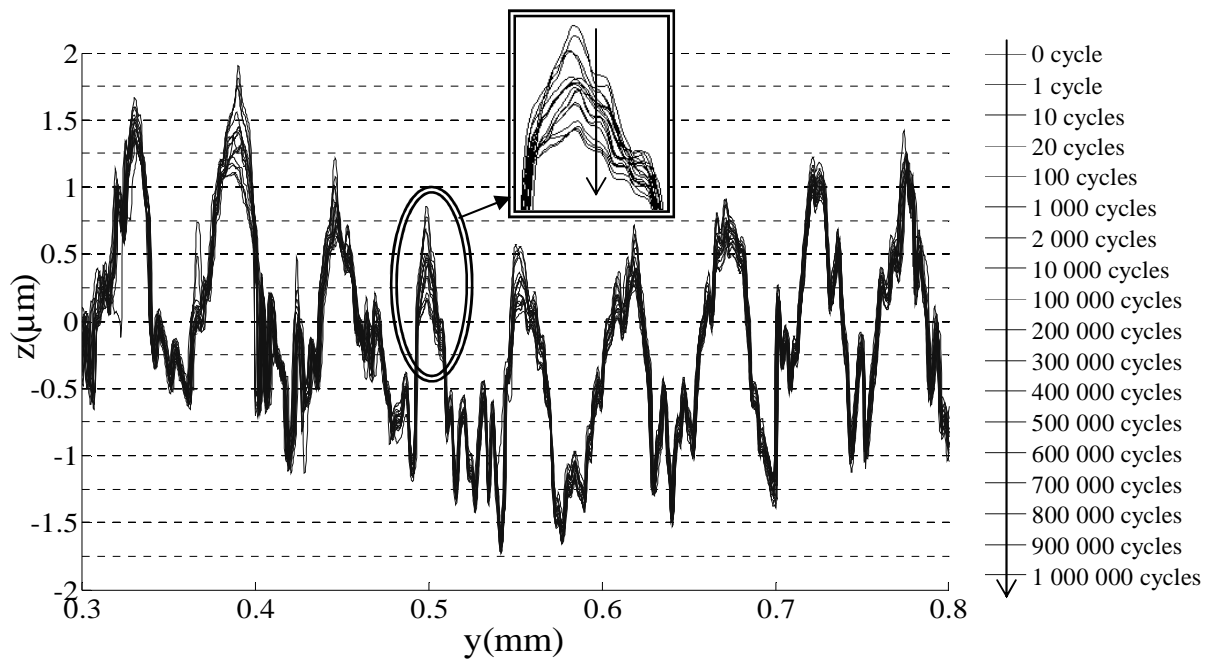


Figure 8. Profils de rugosité d'un galet rugueux, à chaque cyclage.

### ***Etat de surface***

Enfin, la comparaison des images extraites à partir de différents sites sur les galets lisse et rugueux, permet une analyse qualitative de l'usure des surfaces en fonction du nombre de cycles.

La figure 9 montre l'apparition de premiers signes d'endommagement à partir de 100 000 cycles, puis des débuts d'arrachement de matière à partir de 500 000 cycles [4].

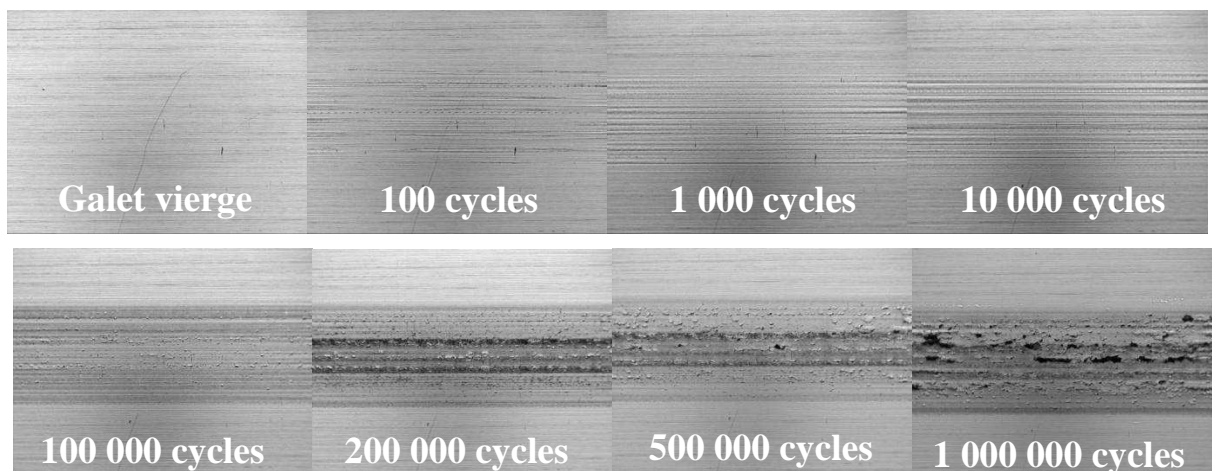


Figure 9. Evolution de la surface en fonction du nombre de cycles.



## 5 CONCLUSION

La  $\mu$ Mag et les outils de mesures associés se révèlent particulièrement adaptés pour l'analyse précise des surfaces des galets grâce une observation in situ, sans démontage, lors d'interruptions de l'essai.

Une méthode de mesure basée sur des marquages à différentes échelles permet d'observer très précisément et de façon reproductible à chaque interruption de l'essai la même zone de la surface et plus finement le même profil.

Ce dispositif d'essai offre un panel d'exploitations des mécanismes de dégradation précis, rapide et efficace. Par la suite, le rodage des surfaces, le mécanisme de balayage des surfaces et les mécanismes de dégradation jusqu'au million de cycles faisant apparaître le micro-écaillage seront analysés.

L'analyse des surfaces via notamment des mesures topographiques reproductibles à l'échelle micrométrique mettra également en évidence l'évolution de la micro géométrie des surfaces, le rôle du lubrifiant et des matériaux en contact. En parallèle des simulations numériques du contact rugueux dans les conditions expérimentales seront effectuées.

## 6 REFERENCES

1. C. Mayeur, P. Sainsot., L. Flaman, *A numerical elastoplastic model for rough contact*, ASME Journal of Tribology, 117(3), 1995, 422-429.
2. P. Sainsot, *Analytical stresses in rough contacts*, Proceedings of the I MECH E Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, 225(2), 2011, 274-279.
3. P. Sainsot, A.A. Lubrecht, *Efficient solution of the dry contact of rough surfaces: a comparison of FFT and MG methods*, Proceedings of the I MECH E Part J, Journal of Engineering Tribology, 225(6), 2011, 441-448.
4. M.-C. Dubourg, V. Lamacq, *A predictive rolling contact fatigue crack growth model: onset of branching, direction and growth. Role of dry and lubricated conditions on crack patterns*, ASME Journal of Tribology, 124, 2002, 680-688.