

# Etude de la fatigue de contact de roulement dans un polymère

Houssein Abbouchi, Arthur Francisco & Bernard Villechaise

Université de Poitiers  
Laboratoire de Mécanique des Solides UMR 6610  
IUT – 4, Av de Varsovie – 16021 Angoulême cedex – France  
[habbouchi@iutang.univ-poitiers.fr](mailto:habbouchi@iutang.univ-poitiers.fr), [afrancisco@iutang.univ-poitiers.fr](mailto:afrancisco@iutang.univ-poitiers.fr),  
[bvillechaise@iutang.univ-poitiers.fr](mailto:bvillechaise@iutang.univ-poitiers.fr)

## Résumé :

*Reprenant l'idée d'une expérimentation de Kaneta et Murakami (1986), nous utilisons une machine bi-disques comportant un galet éprouvette fragile transparent, pour étudier le phénomène de fatigue de contact de roulement. Ce choix nous permet d'observer clairement les fissures aussi bien en surface, ce qui est traditionnel, qu'en profondeur dans la matière.*

*Le banc permet d'imposer une force de traction et une charge normale constantes, à une vitesse de rotation stable. Le galet éprouvette cylindrique est en résine époxy. Le deuxième galet, métallique, est bombé pour obtenir une zone de contact elliptique quasi-circulaire. Les résultats présentés ont été obtenus en l'absence de liquide, lors d'une campagne d'essais.*

*Nous décrivons l'évolution, au cours des cycles, des formes et dimensions des fissures. Nous présentons également les paramètres cinétiques généraux de la famille de fissures.*

## Abstract:

*Inspired by an experimentation of Kaneta and Murakami (1986), we use a twin disc machine with a transparent brittle disc specimen, to study the phenomenon of rolling contact fatigue. This choice enables us to clearly observe as well the surface cracks, which is traditional, as that in-depth in the matter.*

*The bench makes it possible to impose a constant traction force and a constant normal load, at a stable rotational speed. The disc specimen is made of epoxy resin. The second disc is made of metal, and has a round surface to obtain a quasi-circular elliptic zone of contact. The results presented are obtained in the absence of liquid. We describe the evolution, during cycles, of the shapes and dimensions of the cracks. We also present the general kinetic parameters of the family of cracks.*

## Mots-clefs :

**RCF ; fissures ; machine à galets**

## 1 Introduction

La fatigue de contact de roulement (RCF) résulte du passage fréquent sur une surface d'un solide roulant. Ceci se traduit par l'application répétée d'un chargement hertzien, accompagné éventuellement de frottement et d'actions hydrodynamiques. Le phénomène RCF se manifeste par l'apparition de fissures, naissant en surface, se développant en profondeur et formant finalement un réseau de fissures espacées à peu près régulièrement le long des pistes de roulement. Le phénomène comporte deux phases. Une phase d'initiation des fissures : c'est un épisode très lié à la microstructure des matériaux et à la micro-géométrie des surfaces. Une phase de propagation des fissures : le phénomène s'étend à une échelle permettant de considérer le matériau comme un milieu continu et les surfaces seulement définies par leurs caractéristiques macro-géométriques (Proudhon 2007).

Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à cette deuxième phase pendant laquelle les entités pertinentes à considérer sont les contraintes liées au champ hertzien d'une

part et à la présence d'une fissure dans un milieu élastique d'autre part. De plus, si le matériau développe peu de plasticité, ses caractéristiques influentes se réduisent au module d'Young, au coefficient de Poisson et à sa ténacité. On peut alors considérer que le phénomène sera identique quelque soit la nature physico-chimique du matériau et ses caractéristiques micro-structurales. C'est le point de vue que nous avons adopté en décidant de remplacer, dans notre approche expérimentale de la RCF, le métal industriellement concerné par un matériau polymère transparent. Ceci nous a offert l'opportunité d'observer avec une très bonne acuité le développement des fissures de RCF.

L'utilisation de machine à galets pour étudier expérimentalement ce problème date du début de 20<sup>ème</sup> siècle. Il existe plusieurs types de machines : à deux disques (Way 1936), et à quatre disques (Soda et al. 1981). La machine utilisée dans notre étude est un banc d'essai bi-disques.

Un point important est la cinématique des galets. Le premier type est à cinématique libre, le roulement est supposé pur (Way 1936) : un moteur met en rotation un disque qui en entraîne un autre. Le deuxième type est à cinématique imposée. Les vitesses des deux disques (entraînant et entraîné) sont imposées pour créer un glissement déterminé. Ce type est lui-même divisé en deux catégories. Pour la première (Murakami et al. 1997), les deux disques sont entraînés par le même moteur, à travers un système d'engrenages. Pour la deuxième catégorie (Soda et al. 1981), il y a un moteur pour l'ensemble des galets entraînant et un moteur pour l'ensemble des galets entraînés. La machine que nous utilisons est de ce point de vue originale : un moteur entraîne l'un des galets et un frein sur l'autre impose un glissement.

Le matériau du galet éprouvette est également un point important. La majorité des études a été faite avec des éprouvettes métalliques. Toutefois Kaneta et Murakami (1986) ont utilisé un disque pré-fissuré usiné en poly-carbonate pour observer l'effet de la présence d'huile sur la propagation des fissures. L'éprouvette utilisée dans la présente étude est constituée d'un matériau transparent élastique fragile.

Les formes de fissures et le lien avec la direction de mouvement et de glissement, leur évolution en surface (Murakami et al. 1997) et en profondeur (Soda et al. 1981) en fonction du nombre de cycles sont décrits dans la présente étude. Nous introduirons de plus la notion de famille de fissures.

## **2 Dispositifs expérimentaux**

### **2.1 Banc bi-disques**

Le banc d'essais (Figure 1a) est une machine bi-disques. Un moteur de 0.37 kW entraîne la broche du galet dit menant (galet polymère). L'entraînement se fait par un système de poulies et une courroie crantée. Un variateur permet de contrôler la vitesse de rotation du galet menant de 0 à 700 tr/min. Le galet menant est en contact avec le galet mené. Les galets sont coplanaires.

Pour assurer une force tangentielle entre les galets, un frein à poudre est utilisé pour freiner le galet mené par un système de poulies et une courroie crantée, il nous permet d'appliquer une force tangentielle comprise entre 8 et 134 N. Le frein à poudre est piloté par sa tension d'alimentation, via un variateur de tension. La mesure du couple est assurée par un capteur de couple statique.

La charge normale est obtenue grâce à un système de masse et bras de levier appliquée au galet mené. La mesure de cette charge est assurée par un capteur de force de traction compression. Deux encodeurs de rotation incrémentaux sont montés sur les broches pour compter le nombre de tours.

### **2.2 Dispositif de prise des photos**

Pour suivre l'apparition et la propagation des fissures, un vidéo-microscope (Figure 1b) est utilisé. Un rail circulaire permet au vidéo-microscope de tourner (angle  $\alpha$ ) autour de la piste de roulement (axe  $\Delta$ ). Ceci permet de voir la piste depuis l'intérieur du galet et donc les fissures en profondeur. Le support de galet est installé de façon que la surface de contact soit tangente à l'axe de focalisation  $\Delta$ . La rotation  $\beta$  permet de voir le galet sur 360°

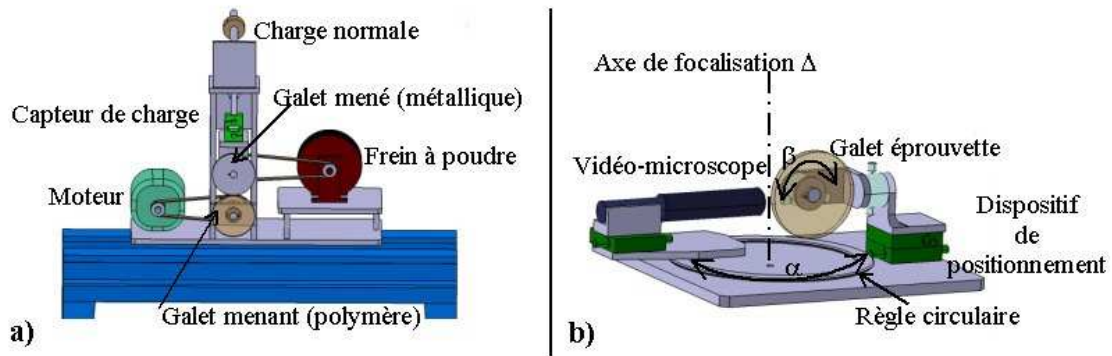


FIG. 1 – a) Face avant de banc d'essai b) dispositif de prise de photos

### 3 Eprouvettes

#### 3.1 Galet métallique

Le galet mené de rayon 80mm et d'épaisseur 10mm est réalisé dans un matériau métallique pour dissiper au mieux l'énergie thermique liée au contact. Pour assurer un contact permanent, la surface de contact de galet métallique est bombée (rayon de bombé : 40 mm).

#### 3.2 Galet polymère

Un des buts de ce travail étant de suivre la propagation des fissures en profondeur, un matériau fragile et transparent (époxy) a été choisi. Les caractéristiques de ce matériau sont : module d'Young  $E=3770\text{Mpa}$  et limite de résistance  $R_m=60\text{Mpa}$ . Le galet est de rayon 40mm et d'épaisseur 10mm.

### 4 Procédure suivie pour un essai de RCF

La succession des étapes est la suivante : -mise en place des galets, -mise en charge, -montée progressive de la vitesse jusqu'à la valeur souhaitée, -montée progressive du couple de freinage jusqu'à la valeur souhaitée, tout ceci en moins de 1000 cycles. Après un nombre de cycles prédéterminé ( $\gg 1000$  cycles), l'essai est arrêté en suivant une procédure inverse.

Le galet époxy est démonté et observé sur le dispositif vidéo-microscope. En cas de fissuration, deux photos en surface (Figure 2a) et en profondeur (Figure 2b) sont prises tous les 10 degrés d'angle  $\beta$ , ce qui donne 36 photos, chacune couvrant un secteur de  $7.5^\circ$ . Cet ensemble d'opérations est répété jusqu'à un nombre total de cycles prédéterminé.

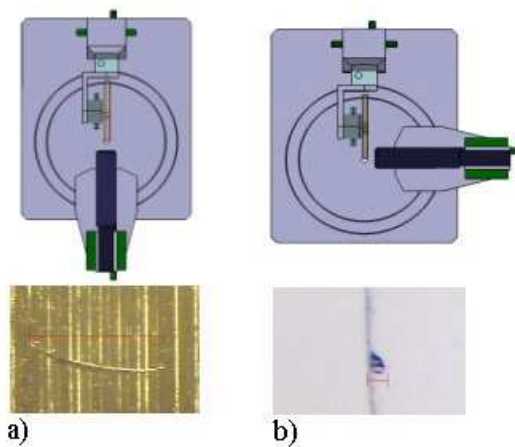


FIG. 2 – Prise de photos a) en surface b) en profondeur

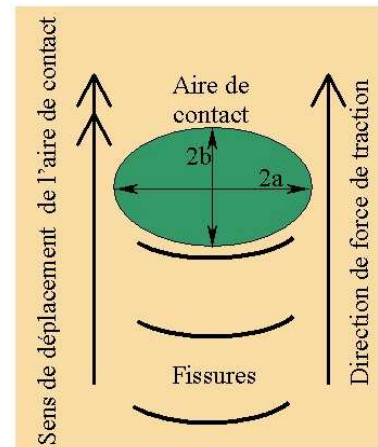


FIG. 3 – Cinématique de déplacement

Pour chaque photo une fissure est choisie parmi les fissures apparues pour être mesurée en surface et en profondeur. Pour l'étalonnage et pour quantifier l'erreur de cette mesure, une mire de résolution a été utilisée. La mire présente des lignes claires sur un fond opaque et son substrat est en verre optique. Cette mire est conforme à la norme USAF-1951 relative aux mires de résolution. On a ainsi estimé l'erreur globale de mesure à  $\pm 5\%$ . Cette erreur vient de plusieurs facteurs : le réglage du zoom, la netteté de focalisation et le positionnement du vidéo-microscope.

## 5 Résultats, test de reproductibilité

Deux galets, notés E022 et E023 sont testés sous les mêmes conditions : charge normale 350 N, vitesse de rotation 500 tr/min, force de traction 60 N. Le contact entre les deux galets est de type hertzien de pression maximale 98.6 MPa. L'aire de contact est une ellipse de grand axe 2.98 mm et de petit axe 2.27 mm. Tous les tests présentés sont faits à sec (sans la présence de lubrifiant). La forme typique de la fissure, l'aire de contact, la direction de déplacement de charge et la direction de traction sont données sur la figure 3.

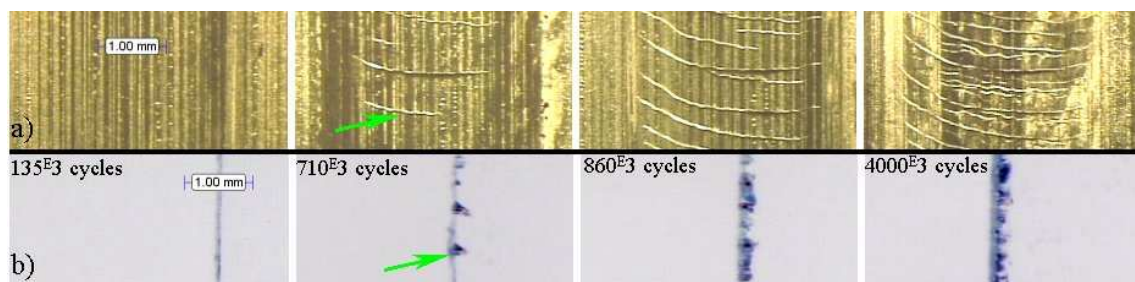


FIG. 4 – Fissures a) en surface et b) en profondeur sur l'angle 130° du galet E022

On commence les essais avec un pas de  $10^3$  cycles et on l'augmente progressivement jusqu'à  $7 \cdot 10^5$  cycles. On a constaté une bonne reproductibilité et un taux de glissement élevé (5%) sur les premiers cycles, mais qui diminue rapidement jusqu'à une valeur stable (0.8%). Un exemple d'apparition et d'évolution des fissures ( $\beta=130^\circ$ , GaletE022) en surface et en profondeur est donné sur la figure 4. La fissure mesurée est fléchée. L'évolution, en largeur des

fissures et en profondeur a été suivie en détail sur 36 fissures. Cinq courbes, représentatives des évolutions en largeur et en profondeur sont données dans les figures 5.

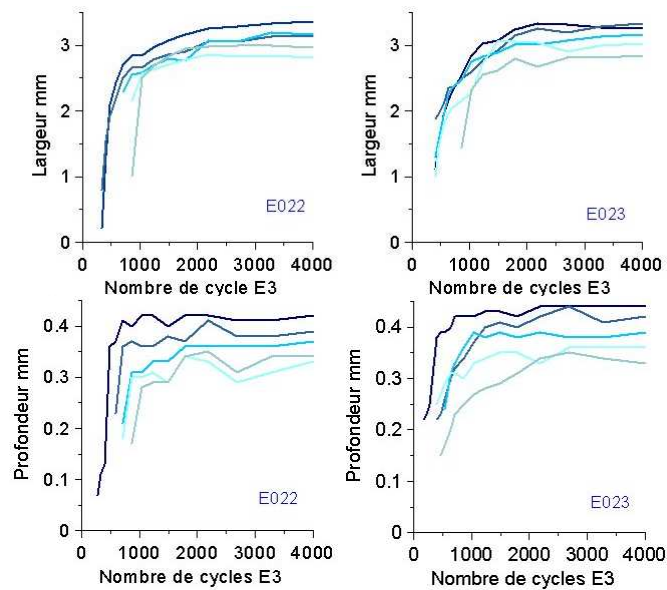


FIG. 5 – Largeur et profondeur (erreur  $\pm 5\%$ )

Les courbes d'évolution en largeur et en profondeur (Figure 6) peuvent être approchées par une équation de type :

$$Fit = L \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{N - N_0}{V}\right) \right],$$

L représente la largeur (ou la profondeur) maximale,  $N_0$

une constante,  $L/V$  une vitesse de propagation et  $N$  le nombre de cycles. Les largeurs de fissures sont légèrement supérieures à la largeur de Hertz. En profondeur, les fissures sont perpendiculaires à la surface de contact et s'arrêtent avant la profondeur de Hertz. Le rapport entre la largeur et la profondeur des fissures pendant l'évolution est donné par la figure 6. A l'apparition des fissures on a un rapport 5 qui augmente ensuite progressivement jusqu'à 9.

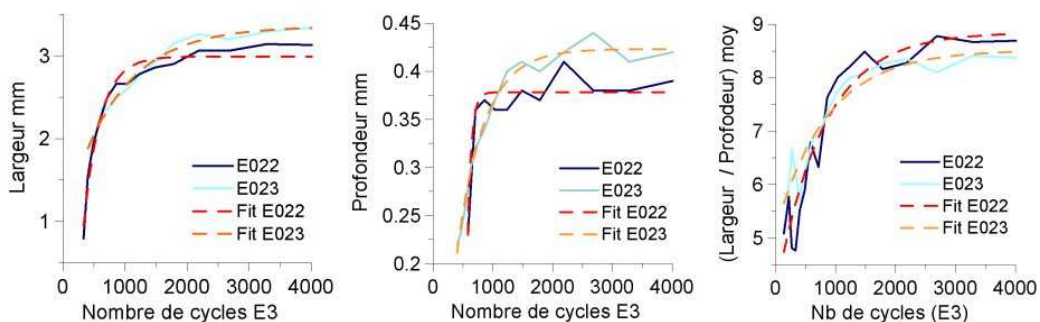


FIG. 6 – Largeur, profondeur et largeur/profondeur moyennes

	Largeur		Profondeur		Largeur/Profondeur	
	E022	E023	E022	E023	E022	E023
L	2.99	3.36	0.38	0.42	8.85	8.51
N <sub>0</sub>	228	-293	519	88	-467	-801
V	270	841	65	452	785	861

TAB. 1 – Détails du « Fit » de la figure 6

## 6 Conclusions et perspectives

Dans cette étude, on a présenté une machine bi-disques et un dispositif d'observation qui ont permis de détecter l'apparition et de suivre l'évolution des fissures en surface et en profondeur dans un galet en polymère. Le banc offre une bonne reproductibilité sur les essais, et les erreurs de mesure ont été évaluées à  $\pm 5\%$ .

D'un point de vue phénoménologique, il ressort que les fissures sont perpendiculaires à la surface, qu'aucune dégradation de type écaillage n'apparaît et que l'effectif de la famille de fissures se stabilise à environ  $2.10^6$  cycles. D'un point de vue quantitatif, des modèles fiables approchant les évolutions des largeurs et des profondeurs des fissures, en fonction du nombre de cycles, ont été explicitées.

Outre un aspect novateur en termes de visualisation, ces résultats expérimentaux constituent aussi un ensemble de données chiffrées qui peuvent servir à corréler des résultats d'études numériques RCF récentes (Ribeaucourt 2006).

Ces travaux constituent la première phase d'une étude qui sera suivie d'autres essais qui quantifieront les effets de la charge normale, de la force tangentielle et de la présence de lubrifiant. Enfin, il s'agira de décrire analytiquement la forme 3D de la fissure, et plus particulièrement de donner une équation du front de fissure.

## Références

- Way, S. 1935 Pitting due to rolling contact. *J. Appl. Mech., Trans. ASME*, **2**, A49-A58
- Soda, N. & Yamamoto, T. 1982 Effect of tangential traction and roughness on crack initiation / propagation during rolling contact. *ASLE Trans.* **25**, 198-206
- Kaneta, M. & Murakami, Y. 1987 Effects of oil hydraulic pressure on surface crack growth in rolling / sliding contact. *TRIBOLOGY INTERNATIONAL* **20**, 210-217
- Murakami, Y. & al. 1997 Experimental and fracture mechanics study of the pit formation mechanism under repeated lubricated rolling-sliding contact: effects of reversal of rotating and change of the driving roller. *J. of Tribology Trans. ASME*, **119**, 788-796
- Proudhon, H. & al. 2007 Three-dimensional study of a fretting crack using synchrotron X-ray micro-tomography. *Engineering Fracture Mechanics*, **74**, 782-793
- Ribeaucourt, R. 2006 Gestion du contact avec frottement le long des faces de fissures dans le cadre de la méthode X-FEM. Application à la fatigue tribologique. Thèse de doctorat, INSA – Lyon, 162 p.