



**HAL**  
open science

## Influence de la pollution solide des lubrifiants sur la durée de vie des mécanismes

Fabrice Ville, Sandrine Coulon, Antonius Lubrecht

► **To cite this version:**

Fabrice Ville, Sandrine Coulon, Antonius Lubrecht. Influence de la pollution solide des lubrifiants sur la durée de vie des mécanismes. 17e Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. pp.1-6. hal-04227035

**HAL Id: hal-04227035**

**<https://hal.science/hal-04227035>**

Submitted on 3 Oct 2023

**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.

# INFLUENCE DE LA POLLUTION SOLIDE DES LUBRIFIANTS SUR LA DUREE DE VIE DES MECANISMES

F. VILLE, S. COULON et A. A. LUBRECHT

Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides (LaMCoS),  
UMR CNRS- INSA n°5514  
Bât. Jean d'Alembert, 20 rue des Sciences, 69621 Villeurbanne Cedex, France  
e-mail : fabrice.ville@insa-lyon.fr

## Résumé :

*La pollution solide des lubrifiants est une des causes de rupture des composants dans les mécanismes (roulements dans les boîtes de vitesses, par exemple). La compréhension du processus d'indentation (création d'un défaut de surface suite au passage d'un débris dans le contact) ainsi que de la formation des endommagements permet de prédire le risque induit. Cette présentation résume les analyses menées et propose une démarche afin de prédire le risque de rupture.*

## Abstract :

*Solid contamination of lubricants is one of the main causes of premature Rolling Contact Fatigue of machine elements (e.g.: rolling element bearings in automotive gearboxes). Understanding the indentation process (creation of surface defect by debris passing through the contact) and the surface damage initiation allows the prediction of the induced risk. This presentation describes the different analyses and proposes a way to predict surface damage due to solid lubricant contamination.*

## Mots clefs :

**Pollution solide des lubrifiants ; contact ; lubrification ; fatigue de contact**

## 1 Introduction

La fatigue de contact initiée depuis la sous-couche à partir d'hétérogénéités —comme les inclusions— est aujourd'hui peu courante du fait des progrès constants réalisés dans la qualité des matériaux et les procédés de fabrication. Néanmoins, le risque de fatigue de roulement initiée depuis la surface reste présent. Une telle fatigue est due aux défauts de surface tels que les stries d'usinage ou les indents. Dans de nombreuses applications, le lubrifiant contient un vaste spectre de particules de tailles et de propriétés très variées et qui ne sont que partiellement supprimées par les filtres. Ce papier insiste sur les effets des indents sur l'état des contraintes dans un contact élastohydrodynamique (EHD) suivant la forme de l'indent et les conditions de fonctionnement.

L'article est divisé en trois parties. Un résumé des mécanismes d'indentation et des conséquences sur la fatigue de roulement initiée en surface est donné dans une première partie. La deuxième partie présente les analyses menées numériquement et expérimentalement afin de prédire le risque d'endommagement lié à ce type de défaut. Dans une troisième partie, une démarche de prédiction du risque d'endommagement lié à la présence de défaut sur les surfaces est présentée.

## 2 Indentation des surfaces [1, 2, 3, 4]

L'indentation de surfaces métalliques due au passage de particules solides en suspension dans l'huile a été

étudiée au moyen d'un banc de pollution conçu pour maintenir un niveau constant de pollution lors de tests sur des galets avec des particules de natures (métallique, SAE AFTD, carbures) et de tailles (de 0 à 100  $\mu\text{m}$ ) différentes, pour diverses conditions de fonctionnement en termes de pression maximale de Hertz, de vitesse de roulement et de taux de glissement. Ces travaux expérimentaux ont été complétés par des tests de fatigue. Un bref résumé de ce travail est effectué ci-dessous.

## 2.1 Déformation ou fragmentation des particules et indents produits

Les résultats d'investigations expérimentales concernant la concentration et la forme d'indents dus aux particules sphériques métalliques [4] et l'influence de la nature et de la taille des particules solides sur les caractéristiques des indents [3] ont déjà été présentés. Les essais ont été menés sur une machine à galets avec un lubrifiant pollué. Quatre polluants différents ont été utilisés (figure 1). Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

1. Les particules fragiles explosent dans l'entrée du contact EHD, produisant de petits fragments. Les débris plus gros que l'épaisseur du film lubrifiant indentent alors faiblement les surfaces comme cela est montré schématiquement à la figure 2(a).
2. Les particules céramiques se brisent également dans l'entrée du contact, produisant des fragments plus gros que ceux dus aux particules fragiles. Les indents provoqués sont plus larges, profonds et ont des bords abrupts, figure 2(b).
3. Les particules ductiles sont laminées lorsqu'elles sont piégées dans le contact. Elles produisent des indents larges et peu profonds dont la taille est liée au diamètre initial des particules, figure 2(c).



FIG. 1 – Vue de différents polluants.

- (a) poudre d'acier (M50) ; distribution : 0-100  $\mu\text{m}$  ; masse volumique : 7800  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 (b) Arizona Fine Test Dust (SAE AFTD) ; distribution : 0-100  $\mu\text{m}$  ; masse volumique : 2650  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 (c) Carbure de Bore (B4C) ; taille moyenne : 45  $\mu\text{m}$  ; masse volumique : 2485  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 (d) Carbure de Silicium ; taille moyenne : 45  $\mu\text{m}$  ; masse volumique : 3110  $\text{kg}/\text{m}^3$

Il a été montré que, pour l'ensemble des conditions de fonctionnement étudiées (roulement pur) et pour les particules ductiles, le nombre des indents sur les pistes de roulement peut être estimé à partir de la concentration en particules dans le volume initial. En effet, le taux d'entrée des particules, rapport entre la concentration des particules dans le contact sur celle dans le volume initial, est proche de 1.

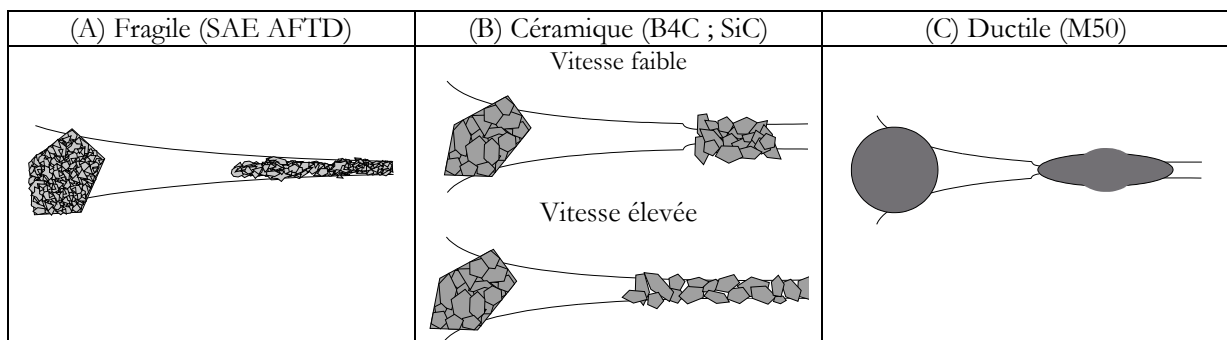


FIG. 2 – Déformation ou fragmentation de particules pour diverses natures de particules.

Un bourrelet est également observé autour des indents, plus marqué derrière l'indent suivant le sens de déplacement des surfaces (ce résultat peut être expliqué facilement par la direction des forces de frottement qui agissent sur les particules lorsqu'elles sont piégées dans le contact). Le nombre et la profondeur des

indents produits par les particules fragiles sont liés à l'épaisseur du film lubrifiant, le nombre d'indents augmentant lorsque le film de lubrifiant diminue. Les indents produits par les particules céramiques ont tendance à être dispersés sur les surfaces pour des vitesses de roulement élevées, tandis que ceux observés pour de faibles vitesses sont beaucoup plus larges. Enfin, il faut souligner que les particules métalliques (comme la poudre de M50) ont la particularité de se déformer en trois étapes –il y a tout d'abord une indentation élastoplastique des surfaces par la particule puis celle-ci est laminée avant d'être éjectée- ce qui leur donne une forme de "soucoupe volante" après déformation et crée un curieux trou dans l'indent [3].

## 2.2 Existence d'un site spécifique de fatigue [5]

Une étude expérimentale et numérique de fatigue de contact suite au passage d'indents dans des contacts EHD a été menée [5]. Les essais ont été effectués sur une machine à galets avec un galet lisse et un autre préindenté par le passage de poudre de M50. Les simulations numériques ont été réalisées en parallèle pour les mêmes conditions de fonctionnement en utilisant un modèle de contact linéaire EHD transitoire associé au calcul de l'état de contrainte élastique dans le massif. En couplant le modèle transitoire EHD avec le calcul du champ des contraintes à chaque pas de temps, il est possible de suivre l'évolution du maximum de la contrainte de cisaillement sous la surface en termes d'amplitude et de position. Il faut rappeler que l'utilisation d'un modèle EHD linéaire alors que les indents sont approximativement axisymétriques est une première étape. Néanmoins, cette analyse donne des informations réalistes et qualitatives pour effectuer une comparaison avec nos études expérimentales.

Les essais de fatigue ont été réalisés avec un taux de glissement de  $\pm 1,5\%$ , une pression maximale de Hertz de 3 ou 3,5 GPa, une vitesse moyenne de 40 m/s, avec des galets en acier 100Cr6 et un lubrifiant de type MIL-L-23699 à une température de 80°C. Ces expériences ont montré que la fatigue de roulement est initiée en aval du défaut suivant la direction de glissement (ou de frottement), comme le montre la figure 3. Il faut noter que les directions de glissement et de frottement sont définies dans le même sens que la direction de roulement lorsque la surface est la plus lente et en sens inverse pour la surface la plus rapide. Cette conclusion expérimentale a été confirmée par les résultats de simulations numériques.

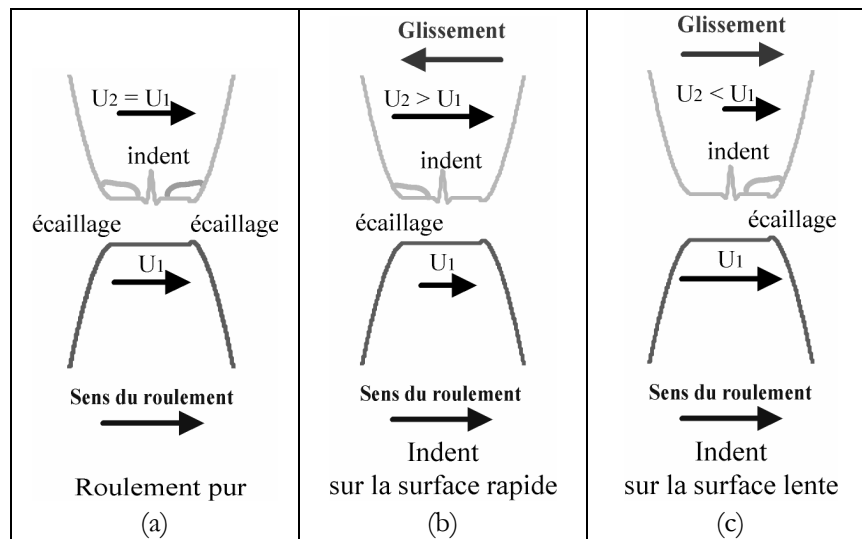


FIG. 3 – Site d'initiation d'écaillages dus à un indent.

(a) roulement pur ; (b) glissement négatif (indent sur la surface rapide) ;  
(c) glissement positif (indent sur la surface lente)

## 3 Risque d'endommagement en présence d'indents [2, 6, 7, 8, 9]

Un des problèmes majeurs lorsque la fatigue de surfaces indentées avec des particules (procédure décrite ci-dessus) est étudiée expérimentalement est la durée importante des essais et le caractère aléatoire de l'étude. En effet, même s'il est possible de contrôler le nombre d'indents produits, leur position et leur forme varient d'un indent à l'autre. C'est pourquoi des indents dits « artificiels », c'est-à-dire produits avec un

indenteur Rockwell, ont été utilisés. Ainsi, il est possible de contrôler parfaitement leurs nombre, taille et position. Des études expérimentales ont été complétées avec des analyses théoriques.

### 3.1 Détermination du risque d'endommagement [6, 7]

Pour arriver à la définition du risque, il faut tout d'abord déterminer le champ de pression induit par les surfaces en contact ainsi que le champ de contraintes qui en découle. La distribution de pression a été calculée en utilisant un modèle de contact sec bidimensionnel. Selon les dimensions de l'indent (profondeur, diamètre et hauteur des bourrelets), trois configurations de contact ont été identifiées (figure 4) i) zone a : l'aire de contact est continue, l'indent est totalement absorbé par les déformations élastiques des surfaces en contact ; ii) zone b : une zone intermédiaire ; iii) zone c : l'aire de contact est discontinue, le chargement est supporté seulement par les bourrelets. Dans la plupart des cas réels, le contact indenté correspond au cas a ou b. Il est à noter que le pic de pression dû à l'indent et défini comme la différence entre la pression maximale et la pression de Hertz à ce point augmente avec la pente de l'indent (rapport entre la profondeur et le diamètre) et diminue avec l'augmentation du rayon de courbure des bourrelets [2, 6].

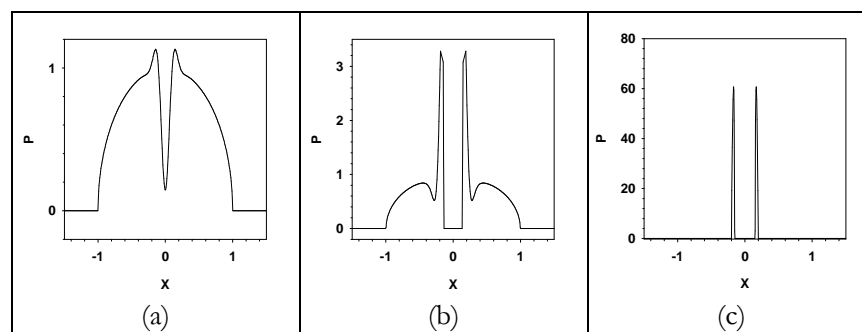


FIG. 4 – Distribution des pressions adimensionnées  
(a) aire de contact continue ; (b) zone transitoire ;  
(c) aire de contact discontinue

Une fois le champ de pression connu, il est alors possible de déterminer le champ de contraintes associé. La contrainte de cisaillement maximal qui dépend directement du pic de pression est prise comme critère de fatigue. La présence d'un indent conduit à des volumes surcontraints importants dans les corps en contact et, pour des indents avec une pente et un rayon de courbure constants, ce volume surcontraint est proportionnel au cube du diamètre des indents.

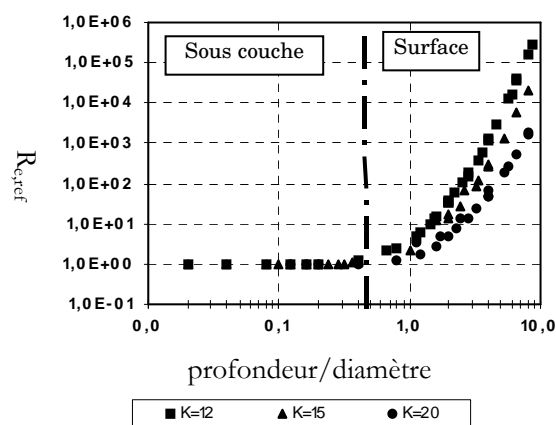


FIG. 5 - Abaquages de risques adimensionnés  
(K représente le rayon de courbure des bourrelets) [7]

Connaissant les champs de pression et de contraintes, il est alors possible de définir un risque

d'endommagement en intégrant les contraintes de cisaillement maximal sur le volume contraint et ainsi d'obtenir des abaques de risque [7] (figure 5).

### 3.2 Observations expérimentales [8, 9]

L'utilisation d'indent artificiel a permis d'étudier la réduction de durée de vie induite ainsi que le processus d'endommagement en fonction des conditions de contact et de la géométrie des indents. Ainsi, l'évolution de la géométrie des indents et des endommagements aux cours des cycles de contact a été analysée [9]. Il a été montré, par exemple, que l'indent atteint une géométrie déformée stabilisée au cours des premiers milliers de cycles et que l'évolution du microécaillage autour des indents est relativement lente.

L'influence des différentes conditions de contact et en particulier celle des conditions de roulement-glissement a également été observée [8]. Il est apparu que le type d'endommagement (microfissuration, microécaillage, écaillage) et sa localisation dépendent directement des conditions de glissement (figure 6). Ceci rejoint les observations faites avec des indents dus à des débris (§ 2.2).

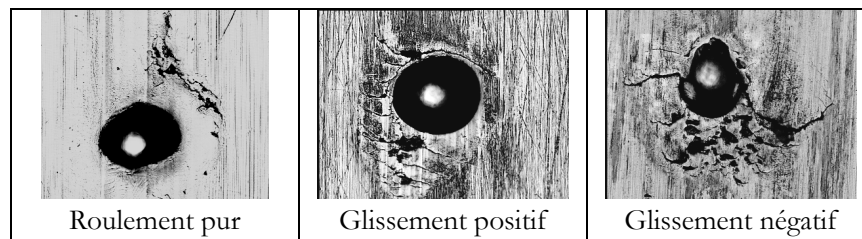


FIG. 6 – Faciès des endommagements autour des indents en fonction du sens de glissement

## 4 Démarche pour la prédiction du risque d'endommagement en présence d'indents [7]

A partir des développements théoriques et des observations expérimentales, il est possible de prédire une réduction de durée de vie. La démarche, présentée en détail dans l'article [7], se décompose en trois étapes. 1) A partir des conditions de contact et de la géométrie des indents, la pente adimensionnée de l'indent est déterminée. 2) Ensuite, le risque de référence adimensionné est déterminé à l'aide de l'abaque (figure 5). 3) Enfin le facteur de réduction de durée de vie rapporté à la durée de vie d'un cas sans endommagement est déduit.

En utilisant cette démarche, il est possible de prédire la réduction de durée de vie relative pour deux surfaces qui comportent des indents de géométries différentes. Par exemple, si deux indents artificiels ont été réalisés à partir de charges différentes sur le pénétrateur (20 et 50 kg), leurs géométries seront différentes (figure 7). Pour des conditions de contact particulières (pression maximale de Hertz de 3.5 GPa, demi-largeur de contact de 0.953 mm et pour des aciers 100Cr6), l'estimation de réduction de durée de vie entre les deux cas en considérant un seul indent est de 9. Dans le cas de plusieurs indents sur la surface, le principe de cumulation de dommage peut être appliqué. C'est-à-dire que le risque total correspond à la somme des produits nombre d'indents d'une géométrie donnée par le risque associé :

$$R_{e,tot} = n_1 \cdot R_{e,D1} + n_2 \cdot R_{e,D2}$$

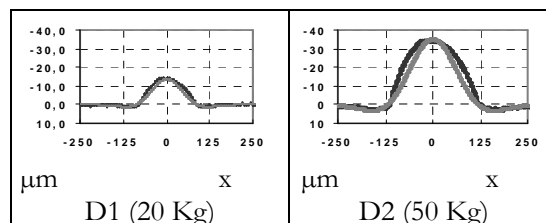


FIG. 7 - Profils d'indents artificiels

De nombreux tests de fatigue ont été réalisés avec différents indents [9]. Par exemple, l'essai n°1 a été réalisé avec 12 indents de type D2 régulièrement répartis sur la surface d'un disque et l'essai n°2 avec 24 indents de type D1. La durée de vie obtenue était de 68.7 et 13.2 millions de cycles respectivement. Le rapport des risques prédits donnait quant à lui 4.6 à comparer au 5.2 qui correspond au rapport des durées de vie obtenues expérimentalement.

## 5 Conclusion

Les mécanismes d'indentation lors du passage de débris ou de particules solides dans les contacts lubrifiés ont été observés et ont permis d'établir une classification à partir des propriétés des matériaux des débris (ductile, fragile, céramique). Ensuite, la fatigue de contact qui en résulte a été analysée et des sites spécifiques d'endommagement ont été mis en avant (fatigue initiée en aval selon la direction de glissement ou de frottement). En utilisant des indents artificiels, il a été possible de réaliser de nombreux essais afin d'identifier les mécanismes d'endommagement selon les conditions de contact et d'analyser les réductions de durées de vie suivant le nombre et la géométrie des défauts. Enfin, à partir de développements théoriques, un abaque de réduction de durée de vie permettant la prédiction du risque en fonction des indents (nombre, géométrie) et des conditions de contact a été mis en place.

## Références

- [1] Ville, F., 1998, 'Pollution solide des lubrifiants, indentation et fatigue des surfaces', thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 163 pages.
- [2] Coulon, S., 2001, 'Prédiction de la durée de vie des contacts ponctuels lubrifiés en présence d'indentations', thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 202 pages.
- [3] Ville, F., Nélias, D., 1998, 'Influence of the Nature and Size of Solid Particles on the Indentation Features in EHL Contacts', Tribology series "Tribology for Energy Conservation", D. Dowson et al. Editeurs, Elsevier, Amsterdam, Vol. 34, pp.399-409
- [4] Ville, F., Nélias, D., 1999, 'An Experimental Study on the Concentration and Shape of Dents Caused by Spherical Metallic Particles in EHL Contacts', Tribology Transactions, Vol. 42, N° 1, pp. 231-240
- [5] Ville, F., Nélias, D., 1999, 'Early Fatigue Failure Due to Dents in EHL Contacts', Tribology Transactions, Vol. 42, n°4, pp. 795-800
- [6] Coulon, S., Ville, F., Lubrecht, A A, 2002, 'Effect of a Dent on the Pressure Distribution in Dry Point Contacts', Journal of Tribology, vol. 124, no.1, pp. 220-223
- [7] Coulon, S., Ville, F., Lubrecht, A. A., 2002, 'An Abacus for Predicting the Rolling Contact Fatigue Life Reduction due to Debris Dents', Tribology series. no. 40, 28th Leeds-Lyon Symposium on tribology on Boundary and mixed lubrication: science and application, Vienna, Amsterdam, Elsevier Science, pp. 283-294
- [8] Diab, Y., Coulon, S., Ville, F., Flamand, L., 2003, 'Experimental investigations on rolling contact fatigue of dented surfaces using artificial defects: subsurface analyses', Tribology series. no 41, 29th Leeds-Lyon Symposium on tribology on Tribological research and design for engineering systems, Leeds, Amsterdam, Elsevier Science, pp. 359-366
- [9] Coulon, S., Ville, F., Lubrecht, A. A., 2004, 'Experimental investigations on Rolling Contact Fatigue for dented surfaces using artificial defets', Tribology series, 31rst Leeds-Lyon Symposium on tribology, 12 pages, à paraître