



**HAL**  
open science

## Mise en œuvre d'un dispositif expérimental d'amorçage de fissure en domaine giga-cyclique pour l'étude de la fatigue de contact

Adrien Didier, Naim Naouar, Daniel Nelias, Baptiste Serres

### ► To cite this version:

Adrien Didier, Naim Naouar, Daniel Nelias, Baptiste Serres. Mise en œuvre d'un dispositif expérimental d'amorçage de fissure en domaine giga-cyclique pour l'étude de la fatigue de contact. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280086

**HAL Id: hal-04280086**

**<https://hal.science/hal-04280086v1>**

Submitted on 13 Nov 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.

# Mise en œuvre d'un dispositif expérimental d'amorçage de fissure en domaine giga-cyclique pour l'étude de la fatigue de contact

A. Didier<sup>a,b</sup>, N. Naouar<sup>a</sup>, B. Serres<sup>b</sup>, D. Nélias<sup>a</sup>

a. Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR 5259, 69621 Villeurbanne, France,  
daniel.nelias@insa-lyon.fr

b. Safran SAE, Centre de Villaroche, 77550 Moissy-Cramayel, France,  
baptiste.serres@safrangroup.com

## Résumé :

*Un dispositif expérimental ultrasonore permettant d'étudier l'amorçage de fissures, en domaine giga-cyclique, dans un problème de roulement a été développé. Ce dispositif permet ainsi de réaliser 20 000 cycles de traction-compression par seconde, l'étude d'un milliard de cycle est donc réduite à 14 h. De plus, la banalisation de caméra à temps d'exposition très court ( $<1 \mu\text{s}$ ) couplé aux récents progrès dans le domaine des mouchetis micrométriques rend possible l'utilisation de la corrélation d'image pour ce type d'étude.*

## Abstract :

*An ultrasonic experimental device allowing to study the initiation of cracks, in the gigacyclic domain, in a bearing problem has been developed. This device thus makes it possible to carry out 20,000 traction-compression cycles per second, the study of a billion cycles is therefore reduced to 14 hours. In addition, the trivialization of cameras with very short exposure times ( $<1 \mu\text{s}$ ) coupled with recent progress in the field of micrometric speckles makes it possible to use image correlation for this type of study.*

**Mots clés : Fatigue gigacyclique, matériau à gradient de propriétés, corrélation d'image, mouchetis micrométrique**

## 1 Introduction

La fatigue des matériaux est un sujet complexe qui occupe chercheurs et ingénieurs depuis des décennies. Ceux-ci cherchant à estimer la durée de vie de pièces ou de structures soumises à des cycles de chargement répétés afin de minimiser les coûts de construction tout en garantissant un certain niveau de sécurité. Dans les domaines où la sécurité de personnes est en jeu, dans l'aéronautique notamment, ou pour la sûreté d'installations sensibles, comme les centrales nucléaires, des taux de défaillance extrêmement faibles ( $< 10^{-7}$ ) voire nuls pour certains composants critiques sont imposés. Il est alors courant de dimensionner des pièces capables de survivre à des dizaines de milliards de cycles, ce qui correspond aussi à des dizaines d'années de fonctionnement. La démonstration de la fiabilité de ces pièces par

l'expérience est extrêmement longue et coûteuse et les modèles prédictifs ne sont guère mieux adaptés faute de données expérimentales fiables.

## 2 Etat de l'art

Il est couramment admis qu'il existe deux phases dans la fatigue des matériaux : l'initiation ou l'amorçage d'une fissure puis la propagation de celle-ci. Dans les applications très chargées la période d'incubation ou la phase d'amorçage est bien plus courte que la phase de propagation de la fissure. A contrario pour les applications très peu chargées, par exemple pour une sollicitation macroscopiquement élastique, le temps nécessaire à l'apparition d'une première fissure est généralement bien plus long que le temps de propagation de cette fissure. Plus précisément, en fatigue oligocyclique, 50% de la durée de vie du matériau est consacrée au développement des microfissures. Tandis qu'en régime gigacyclique, C. Bathias et P.C. Paris [1] ont montré que l'amorçage des fissures correspond à 90% de la durée de vie de l'échantillon.

L'amélioration des conditions de lubrification et des procédés de fabrication d'acier ont permis d'imaginer la création de roulements ayant une durée de vie infinie. L'idée selon laquelle un matériau pourrait avoir une durée de vie infinie en ne s'endommageant pas en dessous d'un seuil de contrainte a été introduite par Weibull [2] pour ajuster des données statistiques de rupture à partir de tests de traction. Ce concept d'endurance limite a été ensuite étendue aux modèles de fatigue de contact pour les roulements [3], [4], [5].

Or, depuis environ une vingtaine d'années, plusieurs laboratoires de recherche à travers le monde, étudient le comportement en fatigue des matériaux sollicités à très faibles contraintes grâce à de nouvelles machines de fatigue ultrasonique équipées d'un convertisseur piézoélectrique. Ces machines, fonctionnant à très haute fréquence (souvent 20 ou 30 kHz), permettent d'atteindre le milliard de cycles en seulement une demi-journée, ce qui offre de toutes nouvelles perspectives dans l'étude des durées de vie des matériaux susceptibles de se rompre entre  $10^9$  et  $10^{11}$  cycles. On parle alors de fatigue "gigacyclique". Elle succède au domaine de la fatigue dite "mégacyclique" pour lequel les courbes de Wöhler [6] trouvaient tout leur sens. De nombreuses études [7], [8], [9] ont déjà montré que les limites d'endurance établies à quelques millions de cycles étaient devenues obsolètes. Comme le précise C. Bathias [10] entre  $10^7$  et  $10^9$  cycles la contrainte de rupture peut varier de plus de 100 MPa pour certains alliages.

Contrairement aux pièces structurelles les interfaces de contact sont soumises à des chargements complexes (et sévères) qui se traduit généralement par un état de contrainte multiaxial et non proportionnel [11]. Enfin les matériaux utilisés ne doivent plus être considérés comme homogènes lorsque l'on s'intéresse aux très faibles taux de défaillance. C'est notamment le cas des alliages métalliques.

## 3 Système expérimental de fatigue ultra-sonore

Le système de fatigue expérimental que nous avons développé est basé sur les travaux de C. Brugger, T. Palin-Luc et M. Blanc [12]. Ce système est partiellement visible en Figure 1. Il se compose d'un ordinateur de pilotage permettant entre autres d'accorder la fréquence de vibration du système avec sa fréquence de résonance, d'un générateur de vibration Branson et du convertisseur piézoélectrique associé ayant une plage d'utilisation comprise entre 19 500 et 20 500 Hz, de boosters et de sonotrodes permettant d'amplifier l'amplitude du piézoélectrique ainsi que d'un échantillon à tester.

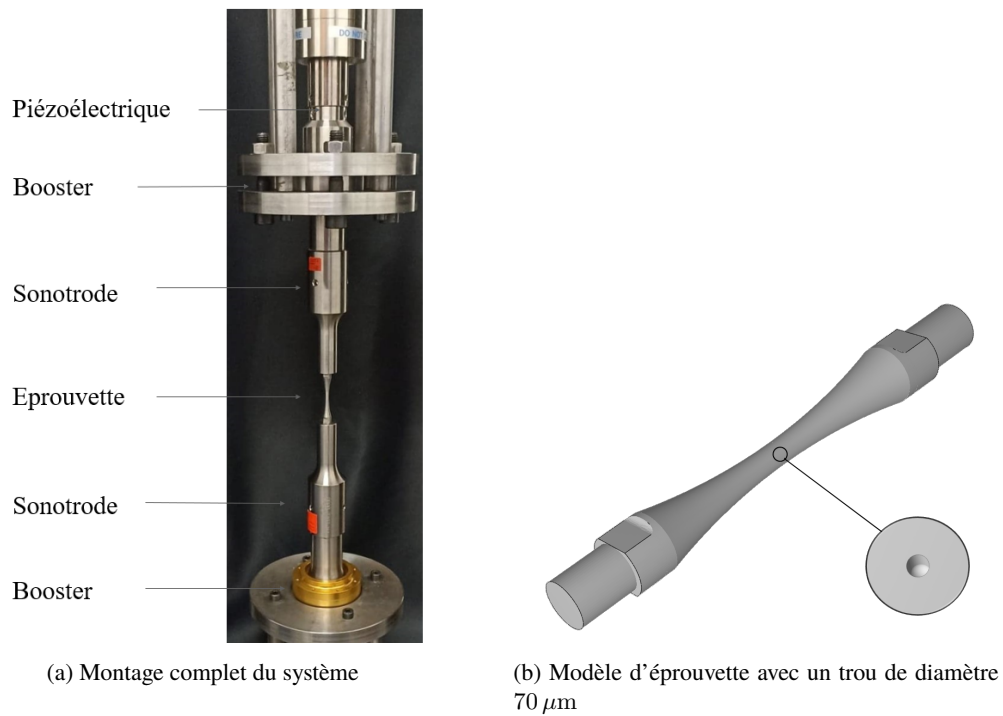


FIGURE 1 – Dispositif expérimental

Les boosters sont situés sur un nœud de vibration, permettant entre autres de fixer facilement ce système à une machine de traction pour appliquer une charge moyenne non nulle. Afin d'étudier l'initiation de fissures sous chargement multi-axial et non proportionnel, un trou de diamètre comparable à la taille d'un indenteur (ici  $70 \mu\text{m}$ ) sera réalisé par électro-érosion d'enfonçage.

Pour qu'un tel montage fonctionne, l'ensemble doit être dimensionné de façon à ce que la fréquence de résonance en mode traction/compression reste dans la plage d'utilisation du convertisseur piézoélectrique soit entre 19 500 et 20 500 Hz.

## 4 Simulation numérique

Pour déterminer précisément la zone d'amorçage de notre éprouvette, nous avons simulé l'écrasement d'une éprouvette via une simulation par éléments finis et le modèle de plasticité de Swift. Nous avons appliqué une précharge en compression de 6000 N puis un déplacement de  $50 \mu\text{m}$  à l'extrémité de l'éprouvette, l'autre extrémité étant fixe, voir Figure 2. Il apparaît alors assez précisément que la zone la plus critique se situe à l'équateur du trou le long de sa génératrice. Il est à noter que la contrainte maximale est ici située  $20 \mu\text{m}$  sous la surface.

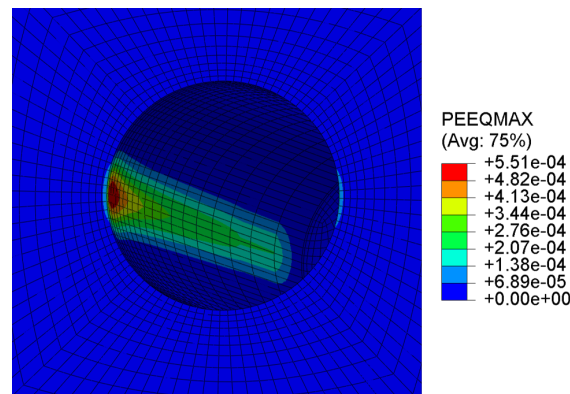


FIGURE 2 – : Déformation plastique équivalente, suite à une précharge de 6000 N et un déplacement de  $50 \mu\text{m}$

## 5 Corrélation d'image

Afin de suivre la déformation de notre éprouvette par corrélation d'image, il est nécessaire de réaliser un mouchetis. Pour réaliser un mouchetis performant, il est possible de se référer aux articles de P. Reu [13], [14], [15], [16], permettant notamment de caractériser la qualité d'un mouchetis. Notre zone d'intérêt faisant  $70 \mu\text{m}$  de diamètre, le mouchetis doit avoir une taille caractéristique de l'ordre du micromètre. Y.L. Dongl et P. Bing [17] décrivent plusieurs méthodes permettant d'obtenir un mouchetis suffisamment résolu. Parmi ces méthodes, l'impression par micro-tampon, développé par A.H Cannon et al. [18], voir Figure 3, est relativement peu coûteuse, répétable et permet de développer un motif personnalisable. Le motif du mouchetis pouvant être choisi précisément, celui-ci est basé sur les travaux de G. F. Bomarito et al. [19] caractérisant un mouchetis idéal.

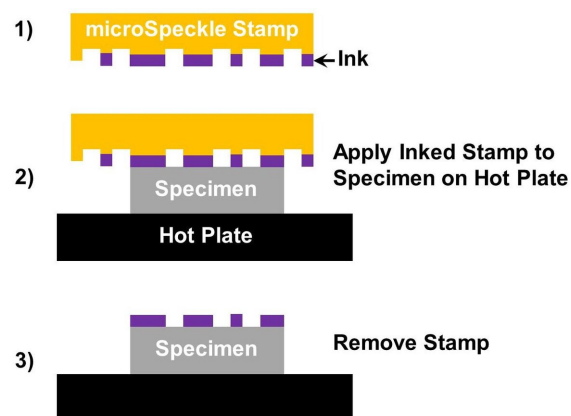


FIGURE 3 – Représentation d'une d'impression par micro-tampon [20]

## 6 Conclusion

La banalisation de l'utilisation de caméras à temps d'exposition très court ( $<1 \mu\text{s}$ ), les récents progrès dans l'application de mouchetis micrométrique et l'avènement des machines de fatigue ultrasonore ont rendu possible l'étude de l'amorçage d'une fissure dans un problème de roulement en domaine gigacyclique. Le tout dans un temps relativement court (14 h pour un milliard de cycle) et sans employer de

matériel spécifique et onéreux (vibromètre laser, tomographie, ...).

## Références

- [1] C. Bathias, P.C. Paris, Gigacycle fatigue in mechanical practice, volume 185. CRC Press, 2004.
- [2] W. Weibull, A statistical representation of fatigue failures in solids. Elander, 1949.
- [3] E. Ioannides, T.A. Harris Tedric, A new fatigue life model for rolling bearings, 1985.
- [4] T. Lösche, New aspects in the realistic prediction of the fatigue life of rolling bearings. *Wear*, 134(2) :357\_375, 1989.
- [5] J.H. Tripp, B. Jacobson, et al. Prediction of rolling bearing life under practical operating conditions. In *Tribology Series*, volume 14, pages 181\_187. Elsevier, 1989.
- [6] C A. Wöhler, Wöhler's experiments on the strength of metals. *Engineering*, 4 :160\_161, 1867.
- [7] N.T. Kihushi, H. Ueda, *Mie Trans*, 15A :1431\_\_1436, 1984.
- [8] K. K. Nishijima, et al. Fatigue fracture of low alloy steel at ultra-high-cycle region under elevated temperature condition ; teigokinko no koon ni okeru choko cycle iki no hiro hakai. *Zairyo (Journal of the Society of Materials Science, Japan)*, 46, 1997.
- [9] L. Drouillac, C. Bathias, P. Le Francois, How and why the fatigue s<sub>n</sub> curve does not approach a horizontal asymptote. *International journal of fatigue*, 23 :143\_151, 2001.
- [10] C. Bathias, R.P. Mora, *Limite de fatigue des métaux*. ISTE Group, 2015.
- [11] D. Nélias, Contribution à l'étude des roulements : Modélisation globale des roulements et avaries superficielles dans les contacts EHD pour des surfaces réelles ou indentées. Mémoire d'HdR, INSA Lyon, 1999.
- [12] C. Brugger, T. Palin-Luc, P. Osmond, M. Blanc, Ultrasonic fatigue testing device under biaxial bending. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 10(37), 46-51, 2016.
- [13] P. Reu, All about speckles : aliasing. *Experimental Techniques*, 38(5) :1-3, 2014.
- [14] P. Reu, All about speckles : contrast. *Experimental Techniques*, 39(1) :1-2, 2015.
- [15] P. Reu, All about speckles : edge sharpness. *Experimental Techniques*, 39(2) :1-2, 2015.
- [16] P. Reu, All about speckles : speckle size measurement. *Experimental Techniques*, 38(6) :1-2, 2014.
- [17] Y.L. Dong, P. Bing, A review of speckle pattern fabrication and assessment for digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 57(8) :1161\_1181, 2017.
- [18] A.H. Cannon, J.D. Hochhalter, A.W. Mello, G.F. Bomarito, M.D. Sangid, Microstamping for improved speckle patterns to enable digital image correlation. *Microscopy and Microanalysis*, 21(S3) :451\_452, 2015.
- [19] G.F. Bomarito, J.D. Hochhalter, T.J. Ruggles, A.H. Cannon, Increasing accuracy and precision of digital image correlation through pattern optimization. *Optics and Lasers in Engineering*, 91, 73-85, 2017.
- [20] RMS. Microstamps with black ink, 1 micron base elements.  
<https://www.researchmicrospeckle.com/shop/10-pack-1-micron-base-element-microspeckle-stamps-black-ink>.