



**HAL**  
open science

## Étude 3D in-situ de la propagation de fissure de fatigue avec effets de surcharge dans un alliage AlSi

Lucas Sancier–Munier, Nathalie Limodin, Jean-Yves Buffiere, Jean-François Witz, Michel Coret, Ghita Bahaj Filali, Yves Gaillard, Michel Fleuriot, Arnaud Weck, Anne Bonnin, et al.

### ► To cite this version:

Lucas Sancier–Munier, Nathalie Limodin, Jean-Yves Buffiere, Jean-François Witz, Michel Coret, et al.. Étude 3D in-situ de la propagation de fissure de fatigue avec effets de surcharge dans un alliage AlSi. Congrès Français de Mécanique 2022, Association Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-03775879

**HAL Id: hal-03775879**

**<https://hal.science/hal-03775879v1>**

Submitted on 13 Sep 2022

**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.

# Étude 3D in-situ de la propagation de fissure de fatigue avec effets de surcharge dans un alliage AlSi

Lucas Sanciet--Munier<sup>a\*</sup>, Nathalie Limodin<sup>a</sup>, Jean-Yves Buffière<sup>b</sup>,  
Jean-François Witz<sup>a</sup>, Michel Coret<sup>c</sup>, Ghita Bahaj Filali<sup>c</sup>, Yves Gaillard<sup>d</sup>,  
Michel Fleuriot<sup>d</sup>, Arnaud Weck<sup>e</sup>, Anne Bonnin<sup>f</sup>, Goran Lovric<sup>f</sup>, Joël  
Lachambre<sup>b</sup>

a. Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube - Laboratoire de Mécanique,  
Multiphysique, Multi-échelle, Lille, F-59000, France

b. INSA Lyon, MATEIS, F-69621 Villeurbanne, France

c. GeM - Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, UMR CNRS 6183, Centrale Nantes,  
Nantes, 44321, France

d. CTIF – Centre Technique des Industries de la Fonderie, F-92318 Sèvres, France

e. Department of Mechanical Engineering, University of Ottawa, 161 Louis Pasteur, Ottawa, ON K1N  
6N5, Canada

f. Swiss Light Source, Paul Scherrer Institut, Villigen, Suisse

\* : lucas.sanciet-munier@centralelille.fr

**Résumé :** Cet article porte sur la quantification expérimentale des effets de surcharge sur la croissance d'une fissure de fatigue au sein d'un alliage métallique, dans le cas particulier d'une fissure courte 3D. La tomographie synchrotron associée à la corrélation d'images numériques 3D rendent accessibles les champs de déplacement autour de la fissure. Il est ensuite possible de calculer des valeurs du facteur d'intensité des contraintes en différents points du front de la fissure, permettant d'y décrire quantitativement l'état de contraintes. Les premiers résultats sont présentés dans cet article.

**Abstract :** This article deals with the quantification the effects of overloads on the growth of small 3D fatigue cracks in a metallic alloy. The combined use of synchrotron tomography and digital volume correlation make it possible to compute the displacement fields around the crack. It is then possible to extract values of the stress intensity factor along the crack front, describing the stress state in that area. The first results obtained with this method are presented in this article.

## Mots clefs : fissure de fatigue, tomographie synchrotron, surcharge, corrélation de volumes numériques, essai in-situ

### 1 Introduction

La propagation des fissures de fatigue courtes et non-débouchantes est marquée par un fort aspect tridimensionnel [1], ce qui limite les protocoles expérimentaux possibles pour évaluer quantitativement le phénomène. Toutefois, l'étude de cette thématique est importante car cette phase de la croissance d'une fissure de fatigue peut représenter la majorité de la durée de vie en fatigue d'une pièce [2]. De plus, pour mieux rendre compte des chargements auxquels sont soumis les composants mécaniques en conditions réelles, il est opportun de s'intéresser aux effets de surcharge sur la propagation de ces fissures courtes. Les surcharges entraînent un ralentissement, voire un arrêt transitoire, de la fissure pendant plusieurs cycles avant une reprise de la propagation à la même vitesse que celle précédant la surcharge. [3]

L'expérience décrite ici a pour objectif de mesurer quantitativement les effets de surcharge sur la propagation d'une fissure courte de fatigue. En particulier, on s'intéressera aux valeurs du facteur d'intensité des contraintes (FIC), qui donne une indication quantitative sur l'état de contrainte en pointe de fissure [3].

Deux techniques seront utilisées : la tomographie synchrotron à rayons X et la corrélation de volumes numériques. La tomographie permet la reconstruction en 3D d'un volume à partir d'une suite de radiographies de l'échantillon prises sous différentes orientations. En tomographie synchrotron, la haute cohérence et la haute énergie du faisceau permettent d'obtenir un contraste de phase entre différents milieux absorbants, ce qui vient s'ajouter au contraste d'absorption déjà disponible en tomographie de laboratoire. Avec le contraste de phase, il est possible de distinguer deux éléments chimiques de numéro atomique proche - et qui ont donc un contraste d'absorption similaire - comme l'aluminium et le silicium dans notre cas. [4]

Avec une machine adaptée, il est possible de réaliser des essais de fatigue *in-situ* dans le tomographe. Ce type d'essais permet l'observation de l'échantillon sous différents niveaux de charge, et permet d'éviter les modifications de chargement dues aux montages et démontages successifs de l'échantillon qui seraient nécessaires dans le cas d'un essai *ex-situ*. [4]

Avec deux images 3D de l'échantillon dans deux états différents, il est possible de calculer les champs de déplacements 3D et reconstituer la déformation menant de l'un à l'autre par *corrélation de volumes numériques* (CVN). Les éléments de microstructure sont utilisés comme mouchetis entre les deux images afin d'appliquer la technique [5].

### 2 Méthodes

Un matériau modèle a été conçu pour l'étude afin de répondre à deux exigences expérimentales : premièrement, il faut que la microstructure présente un mouchetis 3D (rendu apparent en tomographie de par la différence d'interaction avec les rayons X entre les différents milieux) pour rendre possible l'utilisation de la CVN. Deuxièmement, la taille de grain doit être suffisamment petite pour à la fois limiter la tortuosité du front et du plan de la fissure, et limiter les effets de la microstructure sur la propagation. Le matériau développé pour cette étude est un alliage de fonderie AlSi à grains fins ( $\approx 125 \mu\text{m}$ ). Au

sein de l'alliage sont dispersées des particules de Si eutectique dont la forme globulaire est obtenue par coalescence à la suite d'un traitement thermique. Ces particules ont un diamètre de Feret médian d'environ  $5\ \mu\text{m}$  et occupent de 8 % à 10 % du volume (figure 1). On note aussi la présence de porosités (0,05 % – 0,10 % du volume) au sein de la microstructure du fait de l'utilisation d'un procédé de moulage par gravité pour la production des échantillons.

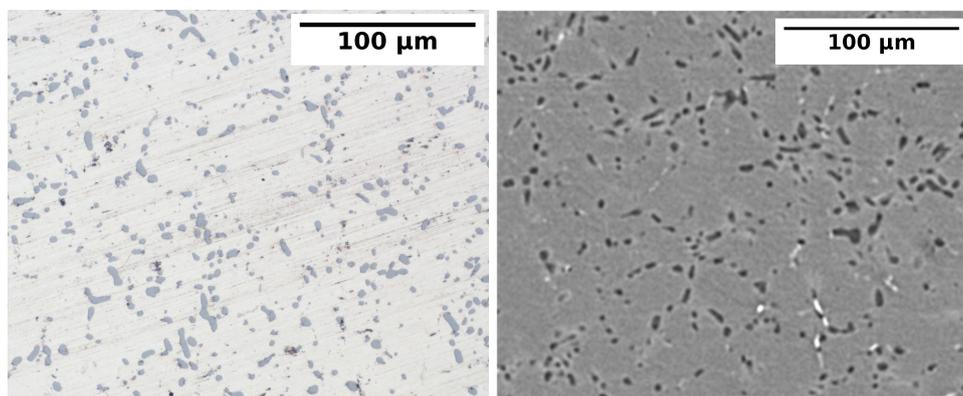


FIGURE 1 – Microstructure de l'alliage utilisé observée en microscopie optique (à gauche) et en tomographie synchrotron avec contraste de phase (à droite). On distingue dans les deux cas les inclusions de Si en sombre sur la matrice d'Al qui apparaît plus claire.

À l'aide d'un laser femtoseconde, les éprouvettes sont entaillées en coin afin de contrôler le lieu d'amorçage des fissures. Cette technique permet d'obtenir des entailles peu ouvertes à fond aigu. Les éprouvettes sont soumises à un chargement cyclique à l'aide d'une machine de fatigue uniaxiale conçue pour des essais *in-situ* dans l'enceinte du tomographe (figure 2).

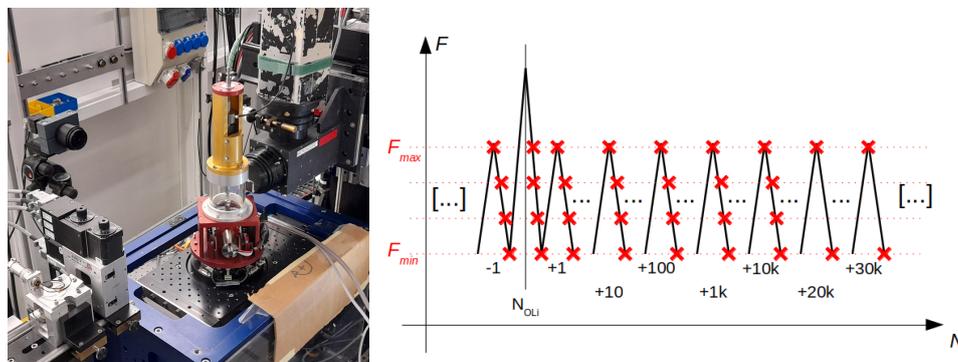


FIGURE 2 – À gauche : montage de la machine de fatigue sur la ligne de faisceau TOMCAT à SLS ; à droite : schéma de principe des acquisitions de scans au cours du cyclage sur la courbe du chargement  $F$  en fonction du nombre de cycles  $N$ . Les différents cycles sont repérés par rapport au cycle de surcharge  $N_{OLI}$ . Chaque croix rouge représente un scan. Note : l'allure du chargement est représentée schématiquement ici comme étant triangulaire, mais elle est en réalité sinusoïdale.

L'expérience s'est déroulée au synchrotron SLS du Paul Scherrer Institut en Suisse, sur la ligne de faisceau TOMCAT. Un faisceau monochromatique avec une énergie de  $21\ \text{keV}$  a été utilisé. Les volumes reconstruits ont pour taille  $2560 \times 2560 \times 2160\ \text{vox}$  pour une taille de voxel de  $0,65\ \mu\text{m}$ . Le temps de scan était de 8 minutes. La section utile de l'éprouvette utilisée était de  $1,15 \times 1,15\ \text{mm}$ . Avant l'expérience, une fissure de fatigue a été amorcée au préalable au niveau de l'entaille en soumettant l'éprouvette à un chargement cyclique. Les dimensions initiales de cette fissure étaient de  $400 \times 470\ \mu\text{m}$ . L'entaille seule

mesure  $130 \times 170 \mu m$  (voir figure 4).

L'éprouvette est donc sollicitée cycliquement en fatigue uniaxiale à une fréquence de  $20 Hz$ . Pour les 150000 premiers cycles, les valeurs minimales et maximales de chargement sont d'environ  $20 N$  et  $175 N$  (soit un rapport de charge  $R \approx 0,11$ ). Pour le reste de l'expérience, le chargement a été augmenté entre environ  $40 N$  et  $200 N$  ( $R \approx 0,2$ ). L'expérience a été poursuivie jusqu'à ce que la fissure, initialement en coin, traverse toute l'épaisseur de l'éprouvette (pour un total de 412333 cycles).

Au cours du cyclage, des scans de l'échantillon sont effectués pour capturer les différents instants de la propagation. Pour un cycle donné, un certain nombre de scans (jusqu'à 4) sont enregistrés pendant la phase de décharge, régulièrement espacés entre la charge maximale et la charge minimale (voir figure 2).

Une fois que la propagation de la fissure est jugée suffisante, on applique une surcharge. Pour ne pas faire plastifier le matériau, qui a une limite d'élasticité de  $266 MPa$ , on limite la surcharge à une valeur d'effort correspondant à cette contrainte sur le ligament d'éprouvette restant, soit  $255 N$  ce qui correspond à une surcharge de 25 %.

On poursuit alors le cyclage jusqu'à la reprise de la propagation de la fissure. On répète ensuite le processus de surcharge-reprise de propagation deux nouvelles fois. Les deux surcharges suivantes sont de 20 % puis 14 %. La première, la deuxième et la troisième surcharge sont appliquées respectivement aux cycles  $N_{OL1} = 375211$ ,  $N_{OL2} = 405213$  et  $N_{OL3} = 410832$ .

Pour identifier les champs de déplacement entre deux étapes du chargement, on utilise la CVN avec le logiciel YaDICs [6]. Avant cela, pour réduire le volume des données d'entrée et rendre l'utilisation du logiciel possible, on moyenne les images sur des volumes de  $2 \times 2 \times 2$  voxels, et elles sont ensuite rognées. Les images font finalement  $1024 \times 1024 \times 896 vx$ , où chaque voxel fait  $1,3 \mu m$  de côté.

On utilise une approche pyramidale multi-échelles pour la corrélation. Cela consiste à faire différents calculs de corrélation successifs sur des échelles d'images de plus en plus fines. Par exemple, un calcul "à l'échelle 5" travaillera sur les images d'entrées moyennées sur des volumes de  $2^5 \times 2^5 \times 2^5$  voxels. Le résultat de chaque étape est utilisé pour initialiser la recherche de solution pour l'étape suivante, après un redimensionnement si nécessaire pour correspondre à la nouvelle échelle.

De plus, on peut paramétrer les calculs à chaque échelle pour ne rechercher que certains éléments de la solution. Ainsi aux échelles les plus grossières, on utilise une approche de *flot optique intégré* (*OFI* pour *optical flow integrated*) qui permet de ne rechercher que les transformations globales (mouvement de corps rigide et déformation homogène). Sur ces échelles grossières, l'utilisation des bases locales peut ne pas donner de résultats justes. Il est donc préférable de se contenter de la version intégrée. Aux échelles plus fines, on utilise la base éléments finis (*OFFEM* pour *optical flow - finite elements method*) en initialisant avec la solution de l'étape de flot optique intégré projetée sur le maillage.

Précisément ici, on utilise la séquence de calculs suivante :

- Une étape *OFI* à l'échelle 4 où l'on recherche une solution comme somme de translations ( $T_x, T_y, T_z$ ), rotations ( $R_x, R_y, R_z$ ) et déformations homogènes ( $E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, E_{xy}, E_{xz}, E_{yz}$ ),
- une étape d'intercorrélation à l'échelle 3,
- deux étapes *OFFEM*, à l'échelle 2 puis 1, avec des éléments de taille  $16 \times 16 \times 16$  et un filtrage du champ obtenu avec un filtre médian de taille 3,
- deux étapes *OFFEM*, à l'échelle 1 puis 0, avec des éléments de taille  $8 \times 8 \times 8$  et un filtrage du champ obtenu avec un filtre médian de taille 5.

Les champs de déplacements ainsi obtenus entre la charge maximale et la charge minimale d'un même cycle sont ensuite utilisés pour réaliser des cartes de déplacement d'ouverture de fissure (ou *COD* pour *crack opening displacement*) (figure 5). Celles-ci sont obtenues en calculant la différence de déplacement dans la direction de traction entre les deux plans perpendiculaires à la direction de traction de part et d'autre de la fissure (voir figure 3).

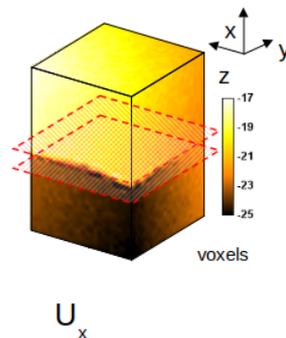


FIGURE 3 – Principe de réalisation des cartes de *COD* sur un exemple issu de [7] (figure reproduite avec autorisation). La carte de *COD* est obtenue en calculant la différence des valeurs de  $U_x$  entre les deux plans marqués en rouge et en hachures qui encadrent la fissure.

De ces cartes, on peut ensuite extraire une valeur de facteur d'intensité des contraintes pour une direction donnée dans la section de l'éprouvette. Sur la fissure, et en déformations planes, le déplacement d'ouverture suit la relation [8] :

$$COD = K_I \frac{8(1-\nu^2)}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \quad (1)$$

où  $E$  et  $\nu$  sont respectivement le module d'Young et le coefficient de Poisson. Une régression linéaire entre *COD* et  $\sqrt{r}$  (figure 6) permet alors de retrouver la valeur de  $K_I$  pour un profil donné (figure 7).

### 3 Résultats & Discussion

Un total de 108 scans de l'échantillon ont été effectués. L'évolution du front de la fissure autour de la première surcharge est représentée en figure 4. Cette figure représente les projections du minimum d'intensité en niveaux de gris sur toute l'épaisseur de la fissure.

On observe que le front de la fissure est mieux défini au moment de la surcharge, indiquant des effets de plastification locale. Après la surcharge, la propagation suit son cours au-delà du front de la surcharge qui reste nettement visible.

L'observation de ces projections sur les scans effectués montre un arrêt de l'avancée du front de la fissure un certain nombre de cycles après la surcharge : entre 1000 et 10000 cycles pour la première, entre 113 et 1114 cycles pour la deuxième et entre 100 et 1000 cycles pour la troisième. Ces observations nécessitent d'être étayées par un calcul comparatif de vitesse de propagation entre avant et après la surcharge pour confirmer et quantifier cet arrêt d'avancée.

Pour chacune des trois surcharges, on s'intéresse ici à trois cycles en particulier pour l'analyse de facteur d'intensité des contraintes (voir figure 2) :

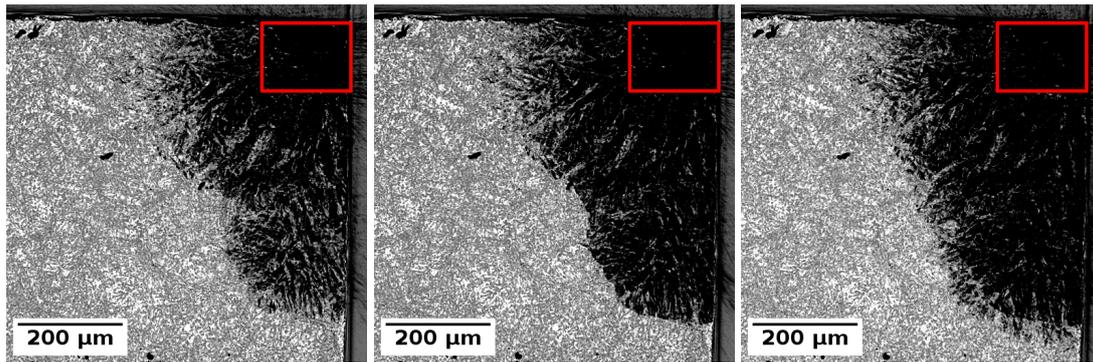


FIGURE 4 – Projection plane de la fissure au cycle  $N_{OL1} - 1$  (gauche),  $N_{OL1}$  (milieu) et  $N_{OL1} + 10000$  (droite). La position de l'entaille initiale est indiquée en rouge.

- le cycle avant la surcharge,
- le cycle de la surcharge,
- le cycle à partir duquel la propagation de la fissure reprend.

Pour chacun de ces cycles, on extrait la carte de COD en effectuant un calcul de corrélation entre les scans pris sous la charge minimale et la charge maximale *du cycle nominal de fatigue* - et non la valeur maximale du chargement atteinte au moment de la surcharge.

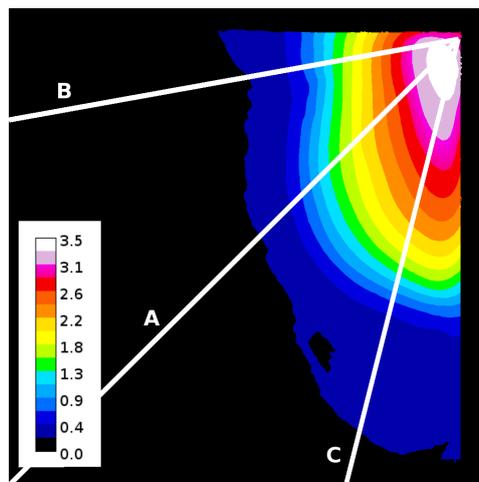


FIGURE 5 – Exemple de carte de  $COD$  au cycle  $N_{OL2} - 1$ . Les valeurs sont données en  $\mu m$ .

Comme mentionné précédemment, en traçant les profils de COD grâce à ces cartes, on peut obtenir une valeur de  $K_I$  pour une direction donnée. On considérera par la suite trois directions définies par leur angle par rapport à l'horizontale  $\phi$  : A ( $\phi = 45^\circ$ ), B ( $\phi = 10^\circ$ ) et C ( $\phi = 76^\circ$ ), indiquées sur la figure 5. Les profils obtenus sont représentés figure 6.

Les 9 valeurs de  $K_I$  obtenues pour chacune des trois directions sont représentées en figure 7. On observe bien une tendance à la hausse entre chacune des trois surcharges : plus la fissure est grande, plus le FIC est important. Cependant, dans le cas des deux premières surcharges, on n'observe pas d'augmentation de  $K_I$  au moment de la reprise de la propagation. Cela pourrait suggérer que même si le FIC reste identique sous charge maximale nominale directement après la surcharge et à la reprise de la propagation, c'est dans les chargements intermédiaires que des effets de variations d'ouverture de fissure peuvent se produire, résultant en une valeur de  $\Delta K$  effective différente, expliquant la reprise de la propagation. Des

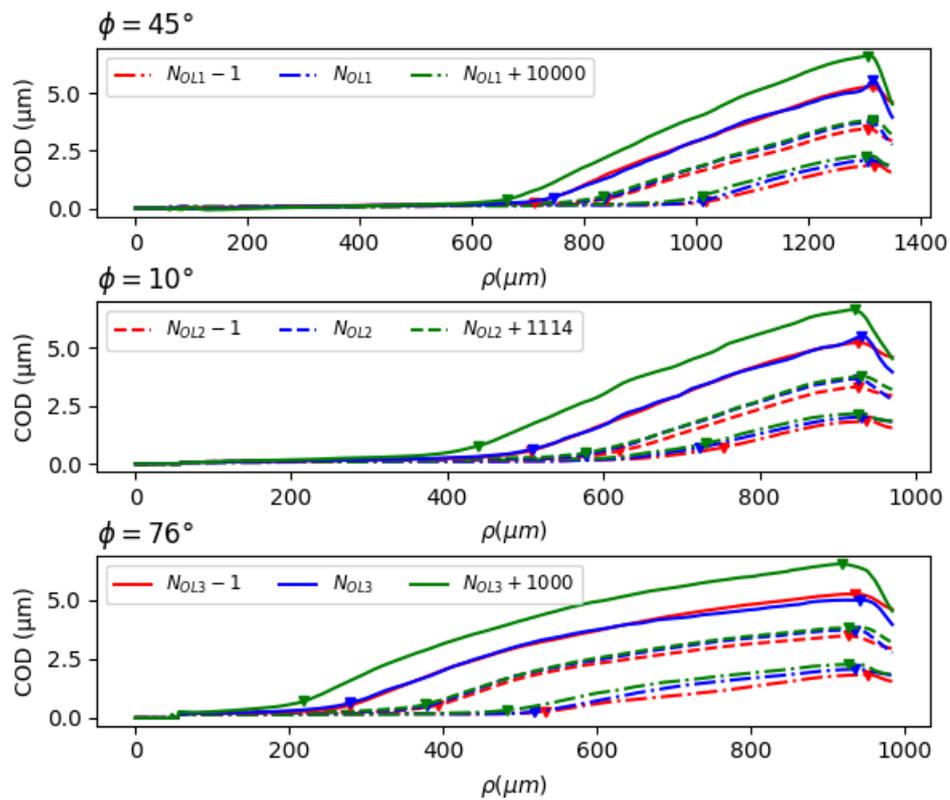


FIGURE 6 – Profils de  $COD$  obtenus sur les cartes d'ouverture obtenues comme celle présentée en figure 5. L'abscisse est notée  $\rho$  car elle diffère de  $r$  par un décalage d'origine. Les triangles sur chaque courbe indiquent la région où est effectuée la régression linéaire. Le triangle le plus à gauche correspond au lieu du maximum de la dérivée seconde de  $COD$  par rapport à  $\sqrt{\rho}$ , et le triangle le plus à droite au maximum de  $COD$ . La régression est faite sur les 90 premiers pourcents de cet intervalle.

analyses supplémentaires sont cependant nécessaires pour étayer ces résultats.

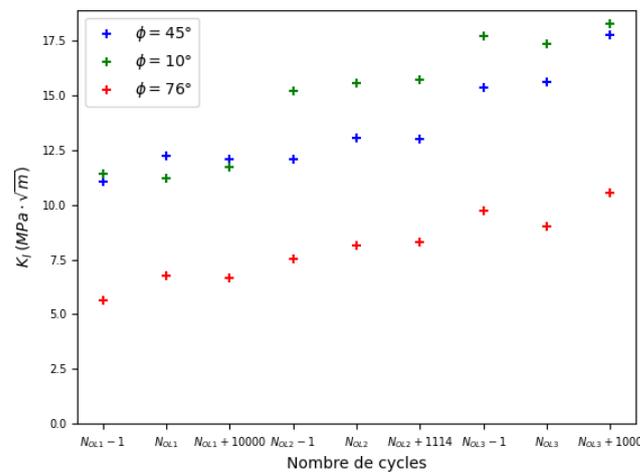


FIGURE 7 – Valeurs de  $K_I$  obtenues pour chaque profil.

## Conclusion

Les travaux présentés ici permettent de valider la réalisation d'un protocole permettant de mesurer les effets de surcharge en 3D sur la propagation des fissures courtes de fatigue. Les premiers résultats suggèrent un comportement de la fissure peu dépendant de la valeur du facteur d'intensité des contraintes sous chargement maximal.

Le traitement des données pourra être poursuivi par une évaluation plus fine des facteurs d'intensité de contraintes tout le long du front de la fissure par l'utilisation des séries de Williams. D'autres aspects seront étudiés comme la taille de la zone plastique, visible dans les champs de déformation. De plus une nouvelle expérience est à venir et permettra d'apporter des améliorations au protocole expérimental (section des éprouvettes plus grande, ajustement des dimensions de l'entaille pour maximiser l'amplitude de la surcharge possible sans plastifier le matériau...)

## Remerciements

Les auteurs adressent leurs remerciements à l'équipe de la ligne de faisceau TOMCAT à SLS pour la mise à disposition de l'équipement de tomographie synchrotron et le soutien technique qu'elle a apporté pour l'expérience. Les auteurs remercient également l'Agence Nationale de la Recherche pour le financement de ces travaux via le projet ADVENTURE (ANR-20-CE08-0017).

## Références

- [1] H. Proudhon, A. Moffat, I. Sinclair, J.-Y. Buffière, C. R. Physique 13 316–327 (2012).
- [2] J. Schijve, *Fatigue of Structures and Materials*, Kluwer Academic Publishers (2009).
- [3] S. Suresh, *Fatigue of Materials*, 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press, (1998).
- [4] J.-Y. Buffière, E. Maire, J. Adrien, J.-P. Masse, E. Boller , Experimental Mechanics 50 :289–305 (2010).
- [5] N. Dahdah, N. Limodin, A. El Bartali, J.-F. Witz, R. Seghir, E. Charkaluk, J.-Y. Buffière, Strain, vol. 52, no. 4, Art. no. 4, (2016).
- [6] R. Seghir, J.-F. Witz, S. Coudert, *YaDICs - Digital Image Correlation 2/3D software*. <https://en.wikipedia.org/wiki/YaDICs>
- [7] N. Limodin, J. Réthoré, J.-Y. Buffière, A. Gravouil, F. Hild, S. Roux, Acta Materialia 57 :4090–4101, (2009).
- [8] T.L. Anderson, *Fracture mechanics : fundamentals and applications*, 2nd ed., CRC, (1995).