

# MODÉLISATION MULTI-PHYSIQUE DE LA PROPAGATION D'UNE FISSURE COURTE DANS UN MATÉRIAU DUCTILE SOLLICITÉ EN FATIGUE

L. Eon <sup>a</sup>, R. Gatti <sup>a</sup>, B. Appolaire <sup>b</sup>, B. Devincre <sup>a</sup>

<sup>a</sup> LEM UMR 104, ONERA-CNRS, [luis.eon@onera.fr](mailto:luis.eon@onera.fr); <sup>b</sup> Institut Jean Lamour, Université de Lorraine

**Mots-clés :** fissure courte, fatigue, dynamique des dislocations, champ de phase

## Résumé

*Le sujet de cette thèse traite de la modélisation de la propagation d'une fissure courte en 3 dimensions dans des matériaux ductiles à l'échelle mésoscopique. Le but est d'étudier les différents mécanismes à l'origine de la propagation d'une fissure courte dans un matériau cristallin, en particulier l'interaction entre la microstructure de dislocations présente et les lèvres de la fissure.*

## 1 Introduction

La rupture par fatigue des matériaux cristallins ductiles comme les métaux cubiques faces centrées (CFC) résulte de la propagation d'une fissure sous chargements cycliques. La modélisation de ce phénomène est importante pour prédire la durée de vie de nombreux matériaux de structure en condition de sollicitations réelles et ainsi éviter des événements catastrophiques.

## 2 Fissure courte

Les caractéristiques de propagation d'une fissure sont différentes selon sa longueur. Les fissures dites courtes sont ainsi distinguées des fissures dites longues. La vitesse de propagation d'une fissure longue dans un métal peut être prédite par la loi de Paris :  $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$ , où  $a$  est la longueur de fissure,  $N$  le nombre de cycles de fatigue,  $\Delta K$  est le facteur d'intensité de contrainte et  $C$  et  $m$  sont des constantes propres au matériau. L'évolution temporelle d'une fissure longue ne dépend donc que du matériau et du type de chargement appliqué. Le comportement d'une fissure courte est, lui, plus complexe puisqu'il dépend de la microstructure du matériau [1] et en particulier des défauts cristallins présents. Ces défauts peuvent être de différentes natures : ponctuels (lacunes, interstitiels), linéaires (dislocations), surfaciques (joints de grains) ou volumiques (précipités). Il est montré dans de nombreux ouvrages [2] que la zone plastique en front de fissure est l'un des principaux facteurs de propagation. Or, le phénomène de plasticité est régi par le mouvement des **dislocations**. Le sujet de cette thèse porte alors sur l'étude des propriétés dynamiques des dislocations en présence du champ élastique singulier induit par une fissure courte chargée de façon cyclique. Plus particulièrement, nous étudierons les mécanismes physiques contrôlant l'émoussement du front de fissure et la relaxation plastique associée à une localisation de la déformation plastique.

## 3 Microstructure de dislocations

Pour modéliser précisément ces phénomènes complexes, des simulations de **dynamique des dislocations (DD)** sont utilisées. La DD discrétise les lignes ou boucles de dislocations en segments. Chaque segment est soumis à une force linéique, appelée force de Peach-Koehler, qui a la forme suivante :

$$\underline{f}_{PK} = \left[ (\underline{\sigma}_{app} + \underline{\sigma}_{int}) \cdot \underline{b} \right] \wedge \underline{\xi}_l \quad (1)$$

avec  $\underline{\sigma}_{app}$  le tenseur des contraintes extérieures appliquées au matériau,  $\underline{\sigma}_{int}$  le tenseur des contraintes internes,  $\underline{b}$  le vecteur de Burgers du segment de dislocation et  $\underline{\xi}_l$  son vecteur directeur normalisé. Dans les méthodes conventionnelles de DD, le champ de contraintes internes utilisé dans la formule (1) pour déterminer la force

de PK est calculé analytiquement en considérant que le matériau est élastique isotrope infini. Cependant, l'introduction d'une fissure fait intervenir des conditions limites plus complexes qui doivent être prises en compte lors de la résolution de l'équilibre mécanique. Pour cela, la DD est couplée à un solveur numérique.

Le **Modèle Discret-Continu (MDC)** développé, depuis plusieurs années au LEM [3] repose sur ce principe et établit un couplage entre la DD et un solveur Éléments Finis (EF). Dans le MDC, la simulation de DD délivre au code EF les incréments de distorsion plastique associés au mouvement des dislocations via le formalisme des *Eigenstrains*, ou déformations libres [4]. En retour, le solveur EF résout le problème de l'équilibre mécanique du cristal compatible avec les conditions aux limites imposées (Figure 1).

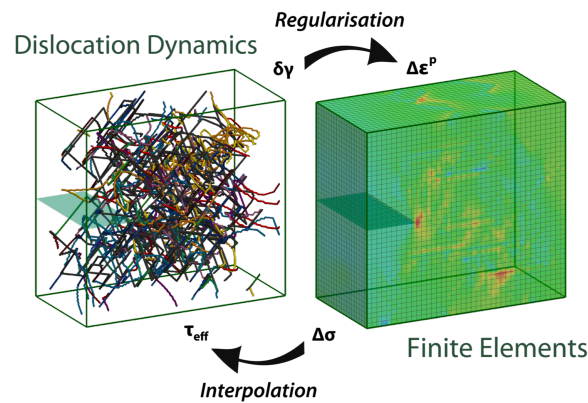


FIGURE 1 – Schéma de principe du Modèle Discret-Continu

Dans le cas d'une première étude réalisée par L. Korzeczek [5], le MDC a été appliqué au cas d'une fissure courte statique sous traction monotone et a permis d'aboutir à une représentation 3D exacte de l'interaction entre dislocations et fissure. La Figure 2 montre une visualisation 3D de la microstructure de dislocations et de la fissure lorsque le matériau est soumis à une traction uniaxiale orthogonale au plan de fissure à  $t = 0$  et à 0,2% de déformation totale.

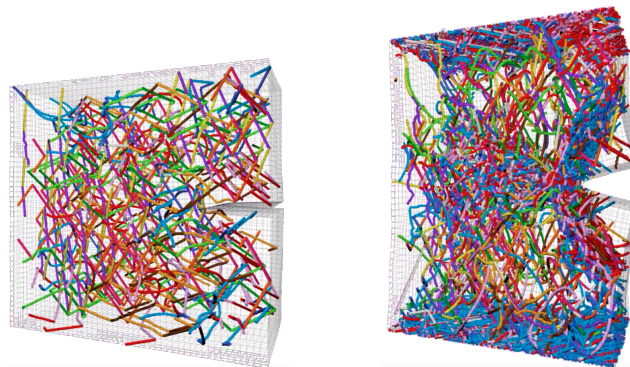


FIGURE 2 – Fissure statique soumise à une traction axiale monotone à  $t = 0$  et à 0,2% de déformation totale

Les résultats montrent que le MDC est un outil bien adapté pour l'étude de la zone plastique en front de fissure et des phénomènes d'écrantage élastique ou d'émoussement en pointe de fissure. La Figure 3 est une table montrant les différents résultats obtenus en terme de : 1) contrainte résolue  $\tau_{RSS} = \sigma_{app} \cdot \chi$ , où  $\sigma_{app}$  est la contrainte de traction appliquée et  $\chi$  est le facteur de Schmid, 2) densité de dislocations et 3) déformation plastique en fonction de l'orientation cristallographique de la fissure.

Ces travaux ont aussi montré que l'utilisation d'un solveur élastique EF est un facteur limitant pour aborder des phénomènes physiques faisant intervenir des déformations cumulées importantes. Une alternative serait alors de coupler le MDC avec un solveur élastique plus rapide.

Dans leur article [6], Moulinec et Suquet proposent une méthode de résolution numérique de l'équilibre mécanique à base de transformées de Fourier rapides (*FFT*). Elle repose sur un algorithme de point fixe qui tient compte des inhomogénéités présentes dans le matériau étudié. Cet algorithme résout l'équation différentielle de

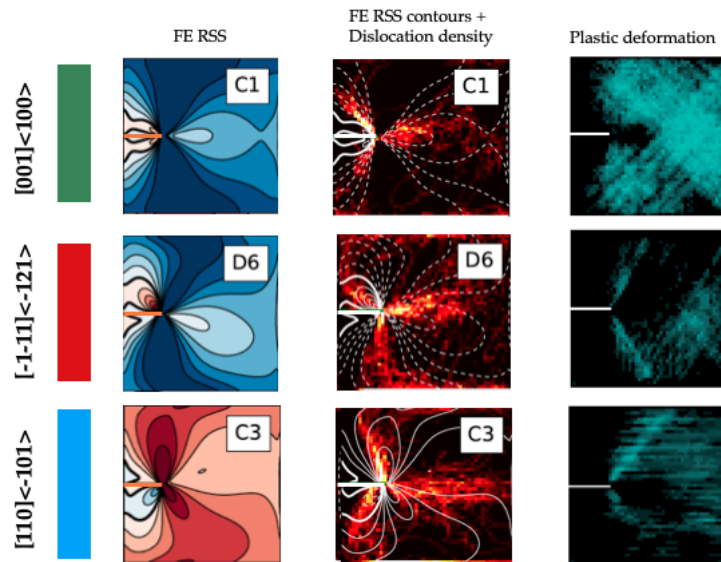


FIGURE 3 – Résultats du MDC appliqué au cas d’une fissure en fonction de son orientation cristallographique : 1) contrainte résolue  $\tau_{RSS}$ , 2) densité de dislocations et 3) déformation plastique [5]. Dimensions du système en deux dimensions :  $20\mu m \times 20\mu m$  ; Longueur de fissure :  $5\mu m$  ; Dimensions du maillage :  $50 \times 50$

l’équilibre dans l’espace de Fourier et renvoie le champ de contrainte dans l’espace direct en utilisant la *FFT*. Cette méthode s’avère être beaucoup moins coûteuse en temps de calcul que les EF pour un maillage donné et semble bien adapté à notre problème dans la limite des déformations finies.

#### 4 Propagation de fissure

Il existe différentes solutions pour la modélisation de la propagation d’une fissure. De nombreux travaux reposent sur l’utilisation de modèles de zone cohésive (*CZM*) [7] qui permettent de décrire les forces de cohésion s’opposant à l’ouverture d’une fissure. Ces modèles ne font généralement intervenir que les valeurs locales des champs. Ils rencontrent donc le problème usuel de la sensibilité du chemin de fissuration au maillage. Parmi les différentes méthodes qui permettent de s’affranchir de ce problème, les **modèles de champ de phase (PFM)** se sont avérés une alternative possible et efficace. En outre, ils ont l’avantage d’offrir une formulation thermodynamiquement cohérente propice au couplage multiphysique souvent nécessaire pour décrire les matériaux multiphasés. Dans le cas de la rupture, ce type de modèle repose sur l’introduction d’un champ (champ de phase)  $\phi(x, t)$  discriminant le matériau sain et la région endommagée ou fissurée,  $\phi = 0$  dans la région saine et  $\phi = 1$  dans la région fissurée par exemple. Le champ  $\phi$  doit être continu à l’interface entre ces deux régions. L’article de Miehe *et al* [8], entre autres, propose un modèle de champ de phase continu adapté à la fissure. La surface interne séparant le matériau sain de la région fissurée est alors localisée par les valeurs les plus fortes du gradient de champ de phase (Figure 4).

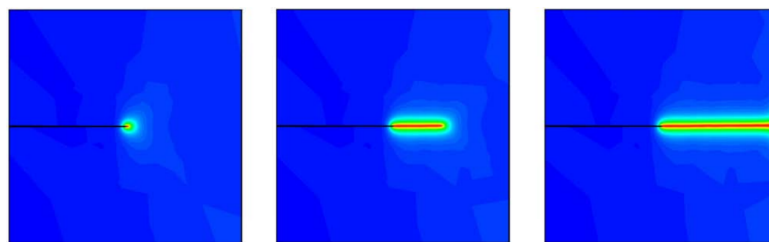


FIGURE 4 – Représentation du gradient de champ de phase appliqué à une fissure en 2D [8]

## 5 Conclusion

L'objectif du présent sujet de thèse est de repartir des travaux de L. Korzeczek pour modéliser la propagation d'une fissure courte en déformation cyclique à des taux de déformation cumulée importants. Cela implique dans un premier temps d'interfacer le MDC avec un solveur élastique *FFT* parallèle puis, dans un second temps, d'établir un couplage fort entre le MDC et un modèle de champ de phase en charge de la propagation de la fissure. Ce couplage constituera une première méthodologique qui devrait permettre d'analyser les mécanismes élémentaires contrôlant les premiers stades de la rupture des matériaux ductiles.

## Références

- [1] D. Taylor, J. F. Knott. *Fatigue crack propagation behaviour of short cracks ; the effect of microstructure*, Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. 4, No. 2, pp. 147-155, 1981.
- [2] S. Suresh. *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press, 1998.
- [3] O. Jamond, R. Gatti, A. Roos, B. Devincre. *Consistent formulation for the Discrete-Continuous Model : Improving complex dislocation dynamics simulations*, International Journal of Plasticity, 80, 19-37, 2016.
- [4] T. Mura. *Micromechanics of Defects in Solids*, Kluwer Academic Publishers, 1982.
- [5] L. Korzeczek. *Modélisation mésoscopique en 3D par le Modèle Discret-Continu de la stabilité des fissures courtes dans les métaux CFC*, Thèse, 2017.
- [6] H. Moulinec, P. Suquet. *A numerical method for computing the overall response of nonlinear composites with complex microstructure*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 157, 69-94, 1998.
- [7] N. Chandra, H. Li, C. Shet, H. Ghonem. *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*, International Journal of Solids and Structures, 39, 2827-2855, 2002.
- [8] C. Miehe, F. Welschinger, M. Hofacker. *Thermodynamically consistent phase-field models of fracture : Variational principles and multi-field FE implementations*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 83 :1273-1311, 2010.