

Prédiction de la durée de vie en fretting-fatigue

G. Rousseau¹, Y. Guilhem¹, C. Montebello², S. Pommier¹

¹ LMT (ENS Paris-Saclay, CNRS, Université Paris-Saclay)

guillaume.rousseau@ens-paris-saclay.fr

yoann.guilhem@ens-paris-saclay.fr

sylvie.pommier@ens-paris-saclay.fr

² Safran Aircraft Engine

claudio.montebello@safrangroup.com

Résumé — Prédire l'amorçage de fissures dans un assemblage soumis au phénomène de fretting-fatigue sous chargement d'amplitude variable est complexe. Les essais mis en place pour caractériser l'amorçage de fissures sont réalisés avec des géométries simples et des chargements d'amplitude constante. De plus, une modification de la géométrie entraîne un changement de la frontière d'amorçage. Cet article présente une méthode non locale, indépendante de la géométrie, permettant de définir une énergie dissipée caractéristique de l'amorçage de fissure.

Mots clefs — Fretting-fatigue ; Contact ; Amplitude variable ; Multiaxial

1. Introduction

Le fretting-fatigue est un phénomène complexe qui apparaît au niveau de la surface de contact de deux matériaux pressés l'un contre l'autre et soumis à des micro-déplacements. Dans cette configuration, des dommages peuvent apparaître au niveau de la frontière entre la zone en glissement partiel et la zone « collée », l'interface entre ces deux zones présentant une concentration de contraintes particulièrement sévère et subissant localement des états de contraintes multiaxiaux, non proportionnels et avec de forts gradients.

La prévision du risque d'amorçage de fissures et de la durée de vie des assemblages subissant des sollicitations de fretting-fatigue ne peut s'appuyer sur les modèles de fatigue usuels qui montrent leurs limites pour les problèmes présentant de forts gradients de contraintes. Par ailleurs, en utilisant la mécanique du contact pour établir la frontière d'amorçage des fissures, on s'aperçoit que cette dernière dépend de la géométrie et qu'il sera donc difficile de transposer les essais réalisés sur les géométries simples (cylindre/plan) sur des géométries réelles (3D et complexe).

La démarche introduite dans la suite présente une méthode non locale pour calculer l'énergie dissipée par frottement au niveau du contact permettant de s'affranchir de la dépendance géométrique et d'un maillage fin.

2. Modélisation

2.1. Modélisation du champ de vitesses

Pour modéliser le champ de vitesses, on suppose que la discontinuité au niveau du contact est suffisamment forte pour imposer la forme de la distribution spatiale à son voisinage et que dans un

repère attaché au front de contact (Figure 1), la géométrie est auto-similaire, ce qui permet d'appliquer le principe de similitude et ainsi appliquer un critère de fretting-fatigue identifié pour une géométrie de contact « de laboratoire » à une géométrie plus complexe de contact entre composants industriels 3D.

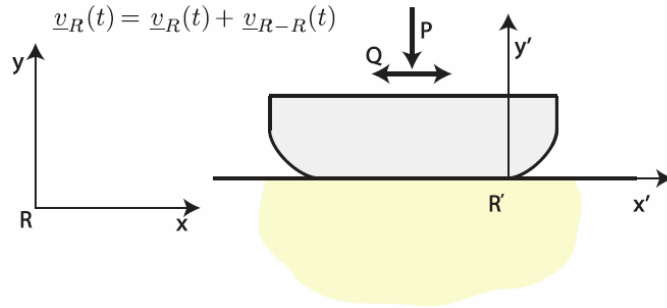


Figure 1 : Référentiel attaché au front de contact

Pour cela, dans la thèse de Claudio Montebello [1], une cinématique adaptée au problème de fretting-fatigue a été proposée (Eq. 1). On peut ainsi exprimer le champ de vitesses comme une somme de produits de facteurs d'intensité (I^s , I^a , I^c) indépendants de la géométrie, et qui constituent les degrés de liberté indépendants du problème, et de fonctions de forme, définies une fois pour toutes et donnant la distribution spatiale du champ de vitesse dans un repère attaché au front de contact.

$$\underline{v}(\underline{x}, t)_{R'} \simeq \underbrace{\dot{I}^s(t) \underline{d}^s(\underline{x}) + \dot{I}^a(t) \underline{d}^a(\underline{x})}_{\underline{v}^e} + \underbrace{\dot{I}^c(t) \underline{d}^c(\underline{x})}_{\underline{v}^c}. \quad (1)$$

En regardant l'erreur de reconstruction du champ de vitesses lors d'un cycle de fretting, on s'aperçoit que lorsqu'on prend uniquement en compte les facteurs d'intensité élastique (I^s, I^a), on a une approximation correcte du champ uniquement lorsqu'il n'y a pas de déplacements relatifs au niveau du contact. La prise en compte du facteur non linéaire (I^c) permet d'avoir une erreur inférieure à 5% sur la reconstruction du champ tout le long du cycle de fretting.

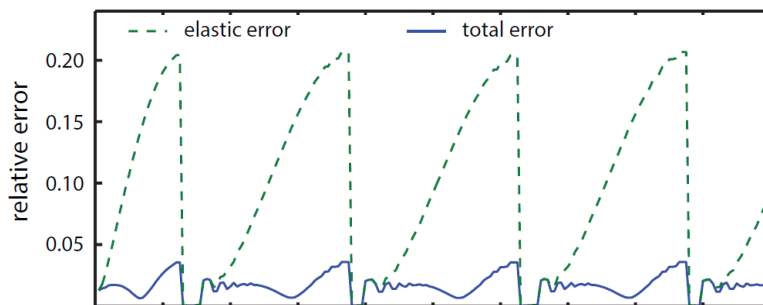


Figure 2 : Erreur relative sur la reconstruction du champ de vitesse

Les frontières d'initiation en fretting-fatigue (**Figure 2**) peuvent alors être représentées à l'aide des nouvelles grandeurs introduites (I^s et I^a). Ces variables sont non-locales par construction (facteur d'intensité d'un champ) et permettent de s'affranchir de l'effet du rayon du cylindre qui était observé lorsque la même frontière était tracée en fonction des grandeurs locales (p et q).

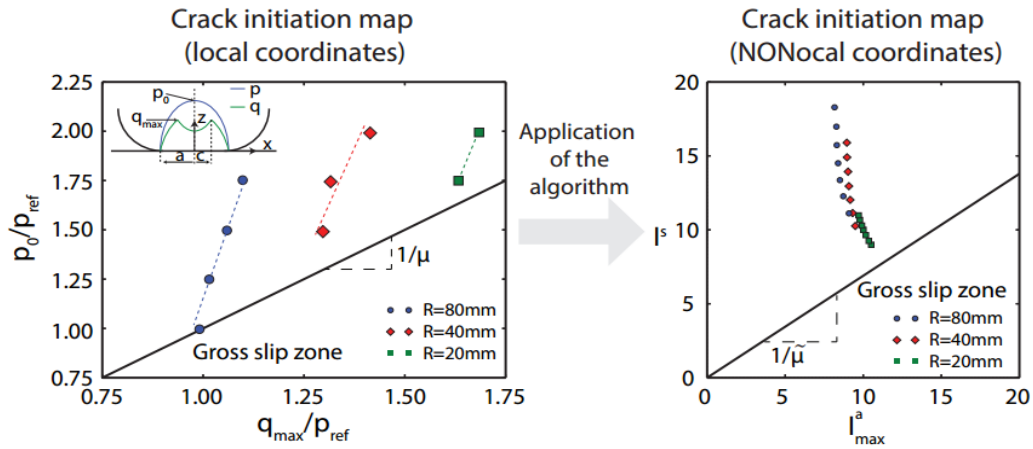


Figure 3 : Frontière d'initiation en fretting-fatigue avec des variables locales et non locales

2.2 Prédiction de l'évolution de la variable I^c

En traçant l'évolution des variables non-locales I^a , liée à la partie linéaire antisymétrique, et I^c , liée à la partie non linéaire (Figure 4), on cherchera à définir une loi de comportement reliant I^c aux autres variables I^a et I^s afin de pouvoir calculer l'énergie dissipée au cours d'un cycle de fretting. Dans notre cas I^s (partie linéaire symétrique) est constant, car l'effort normal P l'est également.

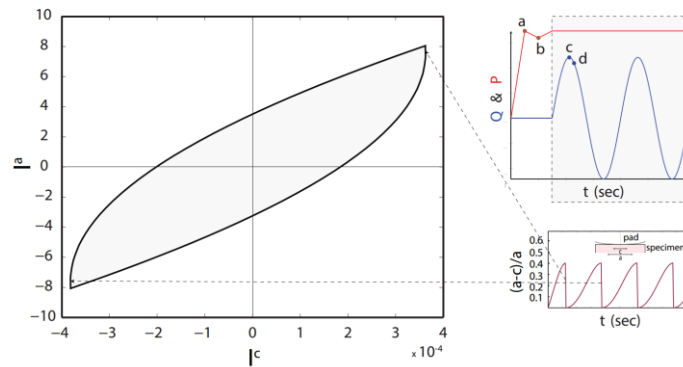


Figure 4 : Évolution I^c/I^a sur un cycle de chargement

On utilisera une forme d'équation (Eq. 2) utilisée dans une loi de comportement développée par R. Desmorat [2] qui permet de modéliser un comportement élastoplastique cyclique multiaxial sans saturation en n'utilisant qu'une seule variable interne d'écrouissage (X).

$$\underline{\dot{X}} = C \left[\frac{2}{3} \underline{\dot{\varepsilon}}^p - \frac{\Gamma X_{eq}^{M-1}}{1 - \Gamma X_{eq}^{M-1}} \langle \underline{d} : \underline{\dot{\varepsilon}}^p \rangle \underline{d} \right] \text{ où } \underline{d} = \frac{\underline{X}}{X_{eq}} \quad (2)$$

En la déclinant pour un problème de fretting-fatigue dans le cas du mode II, on obtient :

$$\dot{I}^a + \Gamma |I^a|^{M-2} I^a |\dot{I}^a| = C \dot{I}^c \quad (3)$$

Après identification des paramètres (C,M,Γ) à partir de la simulation, on est capable de prédire l'évolution de I^c en fonction de I^a lors d'un cycle de fretting où I^s reste constant (Figure 5).

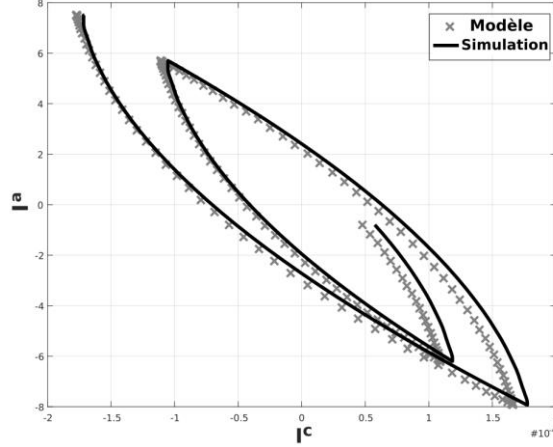


Figure 5 : Comparaison entre le modèle de comportement non-local et la simulation

On voit donc qu'il est possible de mettre en place une loi de comportement permettant de prédire le facteur d'intensité complémentaire en connaissant uniquement les termes linéaires

2.2 Calcul de l'énergie dissipée

Par analogie avec la mécanique de la rupture on peut définir un taux de restitution d'énergie (Eq. 4) et calculer l'énergie dissipée au cours d'un cycle (Eq. 5) où la longueur de fissure a sera remplacée par I^c , qui représente le saut de déplacement maximum au niveau du contact.

$$G_a = \text{sign}(I^a) \frac{1 - \nu^2}{E} \times I_a^2 \quad (4)$$

$$W(\tau) = \int_0^\tau G_a \times \frac{dI^c}{dt} dt \quad (5)$$

À partir des essais en fretting pur réalisés par R. Amargier [3], on obtient une frontière unique en utilisant les grandeurs non locales (I^s , I^a). On peut donc considérer l'énergie dissipée, calculée en un point expérimental comme référence, puis recalculer la valeur de I^a pour les autres points afin de retrouver la même énergie (Figure 6).

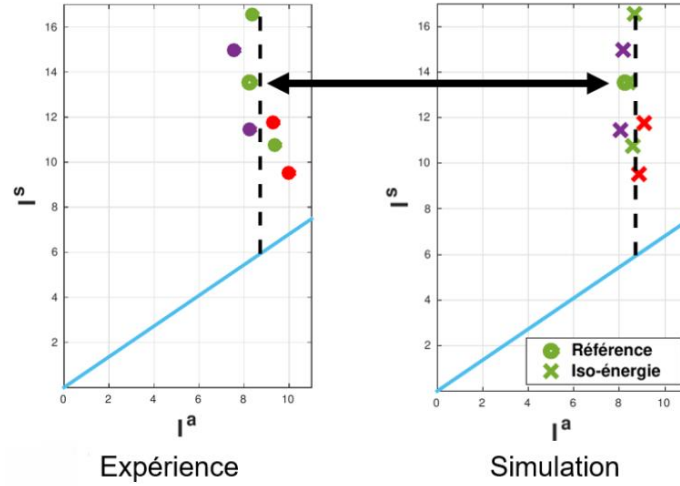


Figure 6 : Détermination des points iso-énergie

En utilisant une énergie (variable extensive) pour caractériser l'amorçage des fissures, on va pouvoir calculer l'énergie critique d'amorçage de fissure avec un essai de fretting sous un chargement d'amplitude constante puis, lors d'un cycle à amplitude variable, retrouver à quel moment on aura la même énergie dissipée et par conséquent l'amorçage des fissures.

3. Enrichissement de la cinématique

Pour pouvoir utiliser cette approche dans le cadre de contacts réels, il est nécessaire d'enrichir la cinématique en prenant en compte le glissement partiel dans la direction parallèle au front de contact. La considération de cette nouvelle direction tangentielle ajoute un terme linéaire et un terme complémentaire à notre approximation du champ cinématique (Eq.6).

$$\underline{v}(\underline{x}, t) = \underbrace{\dot{I}^s(t)\underline{d}^s(\underline{x}) + \dot{I}^{a1}(t)\underline{d}^{a1}(\underline{x}) + \dot{I}^{a2}(t)\underline{d}^{a2}(\underline{x})}_{v_e} + \underbrace{\dot{I}^{c1}(t)\underline{d}^{c1}(\underline{x}) + \dot{I}^{c2}(t)\underline{d}^{c2}(\underline{x})}_{v_c} \quad (6)$$

Pour connaître les champs de référence, on réalise deux cas de chargement simples : le premier où on reproduit le chargement simulé avec le modèle 2D et le deuxième où on applique l'effort tangentiel dans la direction 2 (hors plan). Ainsi, on peut identifier : le champ de référence symétrique (cas 1 et 2), les champs antisymétriques et complémentaires dans la direction 1 (cas 1) et les champs antisymétriques et complémentaires dans la direction 2 (cas 2).

Cela nous permet, lors d'un chargement complexe dans les deux directions tangentielles, d'avoir directement accès aux cinq facteurs d'intensité par projection du champ de vitesses sur notre base cinématique.

En utilisant la méthode présentée dans la partie 2, on peut donc prédire notre nouveau facteur d'intensité non linéaire (I^c) à partir des facteurs linéaires et calculer l'énergie dissipée associée.

3. Conclusion et perspectives

Par ces travaux on a montré qu'il était possible de prédire la partie non linéaire du champ de vitesses en connaissant uniquement la partie linéaire. On peut envisager d'intégrer cette cinématique dans des éléments enrichis afin d'accélérer les calculs de contact en fretting-fatigue : à partir d'un calcul élastique par élément fini possédant un maillage grossier, on peut déterminer les facteurs d'intensité linéaire par projection du champ de vitesse sur la base cinématique précédemment déterminée et retrouver les facteurs d'intensité non linéaires en connaissant ceux linéaires. On est donc capable de déterminer correctement le champ cinématique à proximité du contact sans avoir besoin d'un maillage fin.

Afin de pouvoir étudier les chargements complexes, il faudra prendre en compte la variation de l'effort normal en travaillant dans un référentiel mobile, car cette formulation cinématique est uniquement valable dans un référentiel attaché au front de contact.

Le calcul en temps réel de nos facteurs d'intensité permettrait de connaître l'énergie dissipée dans chaque élément de la surface de contact et de pouvoir prendre en compte l'endommagement de la surface dans le calcul, en définissant un coefficient de frottement local dépendant de cette énergie.

On a aussi montré qu'il était possible de définir une énergie dissipée, caractérisant l'amorçage des fissures, dans un contact soumis à du fretting. Cela donne la possibilité de prédire l'amorçage lorsque le contact est soumis à un chargement complexe à partir d'un essai fait avec un chargement à amplitude constante.

Remerciements

Les auteurs remercient le groupe Safran pour le support apporté à cette étude, et chacun des partenaires du projet IRG Cognac (Safran, ENSMA, Université de Brasilia, ENS Paris-Saclay) pour des échanges scientifiques fructueux.

Références

- [1] C. Montebello, « Analysis of the stress gradient effect in Fretting-Fatigue through a description based on nonlocal intensity factors », 2015.
- [2] R. Desmorat, « Non-saturating nonlinear kinematic hardening laws », *Comptes Rendus Mécanique*, vol. 338, n° 3, p. 146-151, mars 2010.
- [3] R. Amargier, « Amorçage de fissures et gradient de contrainte en fretting et en fatigue », 2011.