

Etude et modélisation de l'endommagement du contact revêtu soumis à des sollicitations de fretting-fatigue

H. Jerbi^a, D. Nélias^a, M-C. Baietto^a

a. LaMCoS, INSA-Lyon, CNRS UMR5259, Bât. J. Jacquard, F69621 Villeurbanne
Cedex, France
hana.jerbi@insa-lyon.fr

Résumé :

Ce travail présente une analyse de l'endommagement des contacts revêtus en fretting-fatigue. Un modèle d'endommagement a été développé et couplé à notre modèle de contact semi-analytique. Ce modèle, basé sur la mécanique des milieux continus, permet de décrire le comportement élastique-endommageable du revêtement. Il s'appuie sur un critère d'endommagement écrit en déformation, pour modéliser l'évolution des propriétés du matériau entre son état sain (initial) et son état endommagé (final). Cette modélisation a permis d'analyser l'influence de plusieurs paramètres sur l'évolution de l'endommagement au cours du chargement cyclique.

Abstract :

This work presents a damage analysis of coated contacts in fretting fatigue. A damage model is developed and coupled with our semi-analytical contact model. This model, based on continuum mechanics, allows to describe the elastic-damageable behavior of the coating. It is based on a damage criterion written in deformation to model the evolution of the properties of the material between the undamaged state (initial) and its damaged state (final). The modelling is applied to investigate the influence of different parameters on the evolution of damage during cyclic loading.

Mots clefs : endommagement, fretting, fatigue, contact revêtu, modélisation

1 Introduction

Dans de nombreux secteurs industriels, le comportement à long terme des matériaux est un point très important à étudier. Un effort important a été fait ces dernières années pour prolonger la durée de vie des structures et prévoir le cas échéant leur rupture.

Dans ce but, il est essentiel d'avoir la meilleure connaissance possible des matériaux étudiés, en terme de microstructure et de propriétés mécaniques de manière à pouvoir suivre ces propriétés sous sollicitations afin d'identifier les mécanismes d'endommagement et de la perte de rigidité mis en jeu, leur initiation et leur développement et ce jusqu'à rupture.

Dans ce cadre, nous nous sommes fixés comme objectif la prédiction de l'endommagement et de la durée de vie des contacts revêtus sollicités en fretting. Un modèle d'endommagement, basé sur la

mécanique des milieux continus, est employé pour décrire l'évolution de la perte de rigidité du revêtement en fonction du nombre de cycles de fretting.

2 Modèle de comportement basé sur la mécanique de l'endommagement

2.1 Présentation de la mécanique de l'endommagement

La mécanique de l'endommagement a connu un développement récent [1]. Elle est fondée sur l'idée que les défauts discrets apparaissant dans le matériau sous charge (fissures, ouverture de porosité) peuvent être intégrés de manière continue dans le comportement macroscopique du matériau endommagé. Une variable de champ scalaire, l'endommagement D , est utilisée pour décrire l'état du matériau: $D = 0$ implique que le matériau est intact et $D = 1$ qu'il est ruiné.

Les mesures mécaniques globales (modifications des caractéristiques d'élasticité, de plasticité ou de viscoplasticité) sont plus faciles à interpréter en termes de variables d'endommagement grâce à la notion de contraintes effectives introduite par Rabotnov [2]. L'intérêt de l'approche introduite par Rabotnov est de permettre de décrire l'influence de l'endommagement sur la résistance à la déformation, ce qui fournit un moyen indirect de mesure de cette variable [3,4]. Ceci se fait au travers de la définition d'une contrainte effective : c'est la contrainte $\tilde{\sigma}$ qu'il faut appliquer à l'élément de volume vierge pour obtenir la même déformation ϵ que celle provoquée par la contrainte σ appliquée à l'élément de volume endommagé. La contrainte effective représente la contrainte rapportée à la section qui résiste effectivement aux efforts. Dans le cas de l'endommagement isotrope, elle s'écrit :

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{(1-D)} \quad (1)$$

et on a : $\tilde{\sigma} = \sigma$ pour un matériau vierge et $\tilde{\sigma} \rightarrow \infty$ au moment de la rupture.

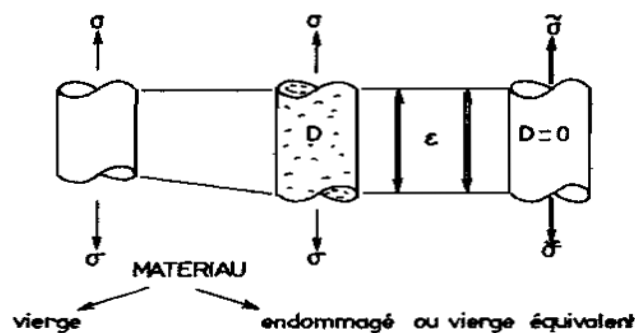


FIG. 2.1 – Contrainte effective et équivalence en déformation

Le principe d'équivalence en déformation implique que tout comportement à la déformation d'un matériau endommagé est traduit par les lois de comportement du matériau vierge dans lesquelles on remplace la contrainte usuelle par la contrainte effective (FIG. 2.1).

Ainsi dans le cas particulier du comportement élastique linéaire, la mesure de la variable d'endommagement D fournit une mesure du module d'élasticité \tilde{E} du matériau endommagé par l'intermédiaire de la valeur E du module d'élasticité du matériau vierge [5] :

$$\tilde{E} = E(1-D) \quad (2)$$

2.2 Modèle d'élasticité couplé à l'endommagement : au sens de Mazars

Un modèle de comportement idéal devrait décrire un comportement élastique avec endommagement. Un tel modèle, s'il est facile à construire, nécessite un investissement considérable en temps avant d'être implanté dans un code de calcul semi-analytique. Un modèle de comportement réaliste devrait contenir une variable interne qui renseigne sur l'état de dégradation ou d'endommagement du matériau.

En vue de son utilisation comme paramètre de croissance de l'endommagement, la déformation équivalente doit être représentative du mécanisme d'endommagement. On propose d'appliquer un critère en déformation inspiré du critère non symétrique en déformation de "J. Mazars" [6], initialement conçu pour décrire le comportement mécanique du béton.

L'expression de déformation équivalente au sens de Mazars, en ne considérant que les déformations principales $\langle \varepsilon_i \rangle_+$ engendrées par les tractions, est donnée par l'équation (3) :

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1,3} \langle \varepsilon_i \rangle_+^2} \quad (3)$$

$$\text{avec : } \langle \varepsilon_i \rangle_+ = \begin{cases} \varepsilon_i & \text{si } \varepsilon_i \geq 0 \\ 0 & \text{si } \varepsilon_i < 0 \end{cases}$$

En appliquant cette expression dans notre modèle de contact, on a considéré que la déformation équivalente, qui doit être une fonction évolutive au cours des cycles, tend à diminuer ce qui n'est pas acceptable. Cependant, pour l'étude de l'endommagement des contacts en fretting, il semble important d'utiliser la totalité des déformations principales en associant la partie des extensions provenant des contraintes de traction ($\langle \varepsilon_i \rangle_+$) avec des extensions provenant des contraintes de compression et celles de cisaillement ($\langle \varepsilon_i \rangle_-$). Sur ce principe, une adaptation de l'expression de déformation équivalente au sens de Mazars est possible et définie par:

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1,3} \langle \varepsilon_i \rangle^2} = \sqrt{\sum_{i=1,3} \langle \varepsilon_i \rangle_+^2 + \sum_{i=1,3} \langle \varepsilon_i \rangle_-^2} \quad (4)$$

$$\text{avec : } \langle \varepsilon_i \rangle_- = \begin{cases} |\varepsilon_i| & \text{si } \varepsilon_i \leq 0 \\ 0 & \text{si } \varepsilon_i > 0 \end{cases}$$

L'endommagement débute lorsque la déformation équivalente atteint une certaine valeur fonction de l'endommagement $K(D)$ donc si la condition (5) est respectée:

$$f(\varepsilon, D) = \tilde{\varepsilon} - K(D) = 0 \quad (5)$$

Tant que $f(\varepsilon, D) = \tilde{\varepsilon} - K(D) < 0$ le matériau est élastique. Le seuil d'endommagement pour un matériau vierge est noté : $K(0) = \varepsilon_{d0}$. La loi de comportement est la suivante :

- Pour $\tilde{\varepsilon} < \varepsilon_{d0}$, le comportement est élastique et $\sigma = E_0 \varepsilon$.

- Dès que $\tilde{\varepsilon} \geq \varepsilon_{d0}$, le matériau s'endommage et on suppose que l'évolution de l'endommagement est donnée par l'équation (6) :

$$D = \frac{\tilde{\varepsilon} - \varepsilon_{d0}}{\varepsilon_R - \varepsilon_{d0}} \quad (6)$$

La mesure de D fournit une mesure du module d'élasticité \tilde{E} du matériau endommagé :

$$\tilde{E} = (1 - D)E_0 \quad (7)$$

Ce qui entraîne la relation contrainte-déformation (8) :

$$\sigma = \tilde{E}\varepsilon = (1 - D)E_0\varepsilon \quad (8)$$

Les paramètres décrivant le comportement sont donc :

- E_0 , le module d'Young initial,
- ε_{d0} , la déformation limite seuil au-delà de laquelle se produit un endommagement,
- ε_R , la déformation à la rupture.

3 Implémentation dans le code semi-analytique

Le modèle mis en jeu dans le cas d'un comportement élastique-endommageable isotrope, est implémenté dans un code semi-analytique élaboré pour la résolution des problèmes de contact. L'algorithme ainsi obtenu est présenté sur la figure (FIG. 3.1).

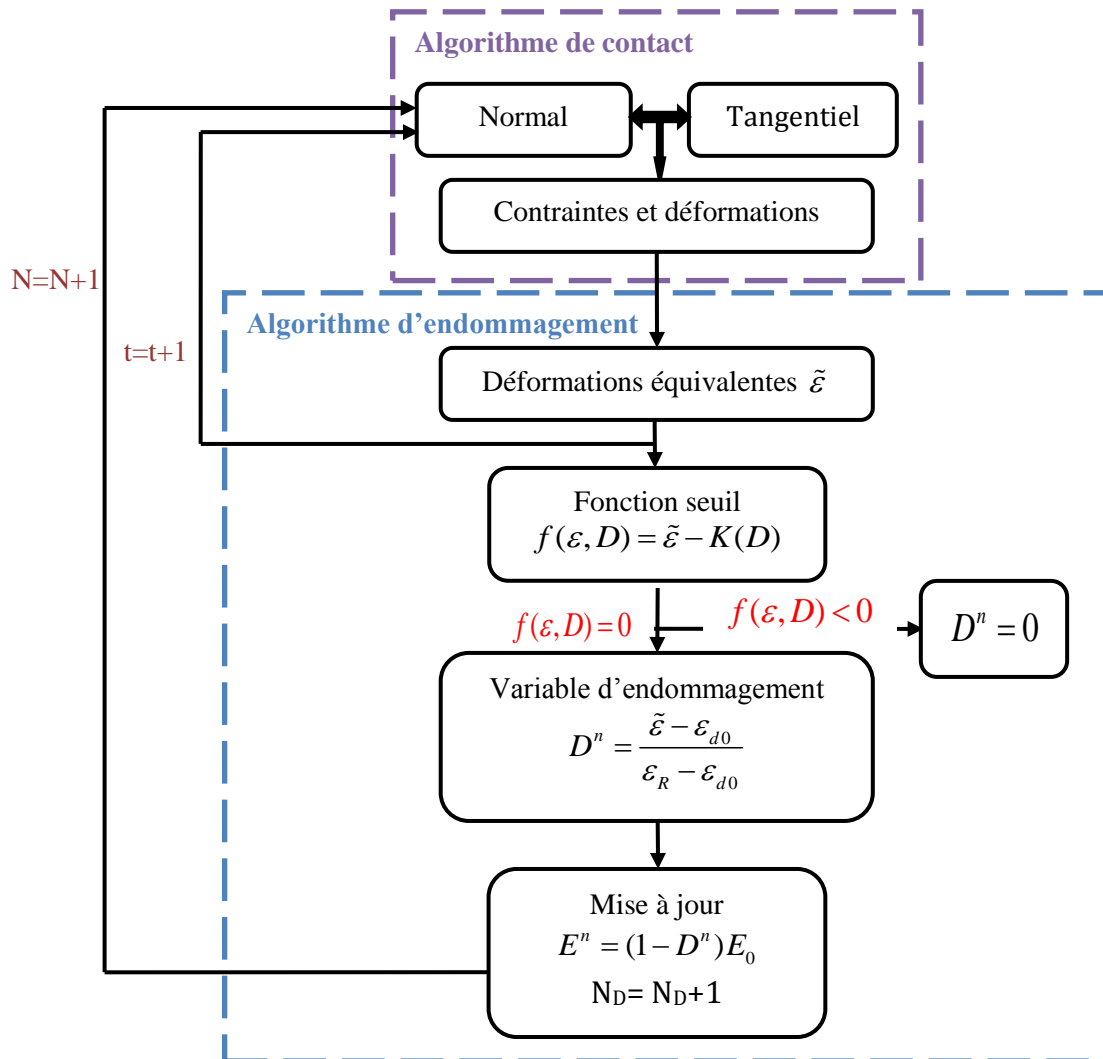


FIG. 3.1 – Schéma de l'algorithme du modèle d'élasticité couplé à l'endommagement

4 Simulation & Résultats

Un contact sphère-plan a été choisi comme un compromis entre la simplicité et la représentativité. Une sphère de rayon $R=25\text{mm}$ et de propriétés ($E_0=210\text{MPa}$, $\nu_0=0.3$). Elle est appuyée contre un plan élastique de propriétés ($E_2=210\text{MPa}$, $\nu_2=0.3$) couvert d'une couche de propriétés (E_1 , ν_1) et d'épaisseur " h " (FIG 4.1). Une sollicitation de type fretting, correspondant à un déplacement tangentiel alternatif δ , est imposée à la sphère, tandis que les surfaces sont maintenues en contact par un chargement normal constant W . Un coefficient de frottement μ est imposé et maintenu constant durant le calcul.

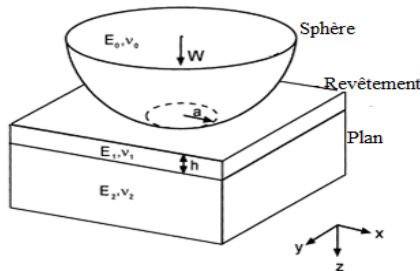


FIG. 4.1 – Contact sphère-plan

Données simulation	W [N]	450
	δ [mm]	0.025
	μ	0.7
Propriétés revêtement	(E_1 [MPa], ν_1)	(210,0.3)
	h	a
Données endommagement	ε_{d0}	$0.15e^{-2}$
	ε_R	$4e^{-2}$

TAB. 4.1 – Simulation de référence

Le tableau TAB. 4.1 présente la configuration de référence. Les résultats présentés par la suite correspondent à cette configuration de référence avec à chaque fois un paramètre modifié.

4.1 Résultats et analyse

- **Simulation de référence.** L'évolution de l'endommagement pour la simulation de référence est détaillée dans la FIG. 4.2 en terme de la variable d'endommagement et de rigidité. La figure montre la dégradation du module du Young normalisé E/E_0 en fonction du nombre de cycles N_{cyc} . L'évolution de l'endommagement passe par trois stades. Dans le premier stade, l'évolution de E/E_0 correspond à l'initiation de l'endommagement, E/E_0 chute rapidement. Dans le second stade, l'allure de la courbe est quasi linéaire avec une cinétique d'endommagement moins importante. Et enfin un dernier stade caractérisé par une chute brutale de E/E_0 qui se traduit par la ruine de la structure à un rythme accéléré.

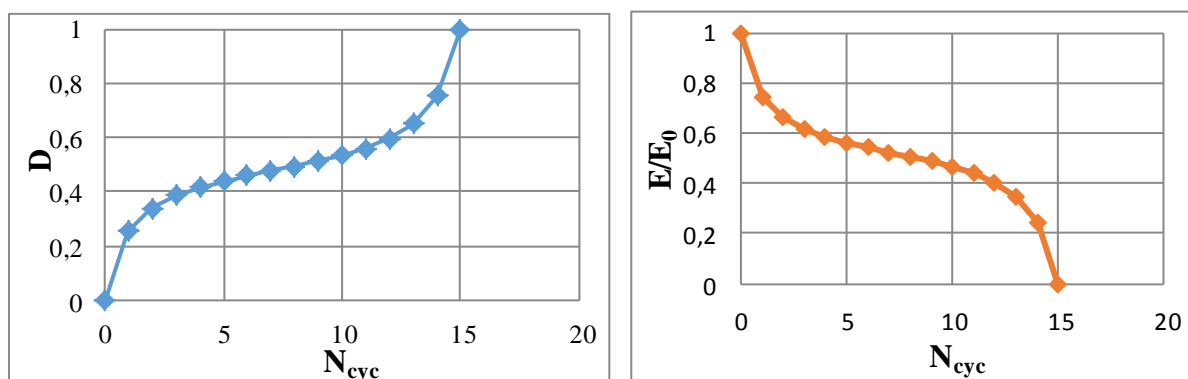


FIG. 4.2 – Evolution de l'endommagement en fonction du nombre de cycles

La distribution de la pression de contact durant les cycles de fretting jusqu'à ruine est obtenue et présentée FIG. 4.3. L'effet de l'endommagement se traduit par une diminution de la pression de contact maximale et élargissement du profil sur les côtés.

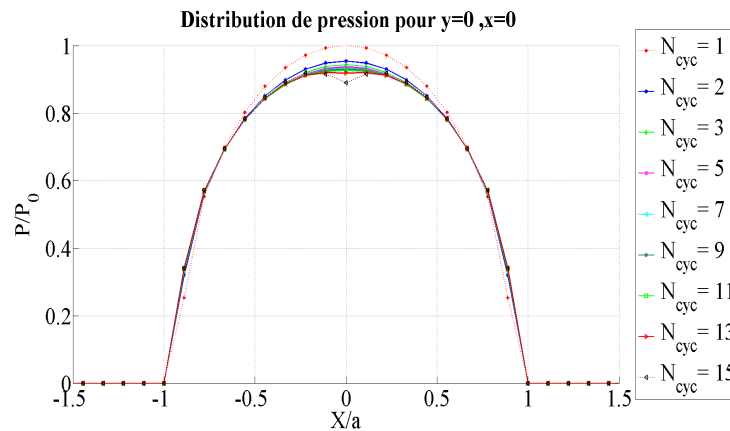


FIG. 4.3 – Evolution de la pression suivant la direction x en fonction du nombre de cycles

- **Influence de la charge normale.** Une nouvelle série de simulations est effectuée. L'impact de la charge normale est étudié et présenté FIG. 4.4 en terme de variable d'endommagement et rigidité. On remarque l'augmentation de la durée de vie avec la réduction de la charge appliquée.

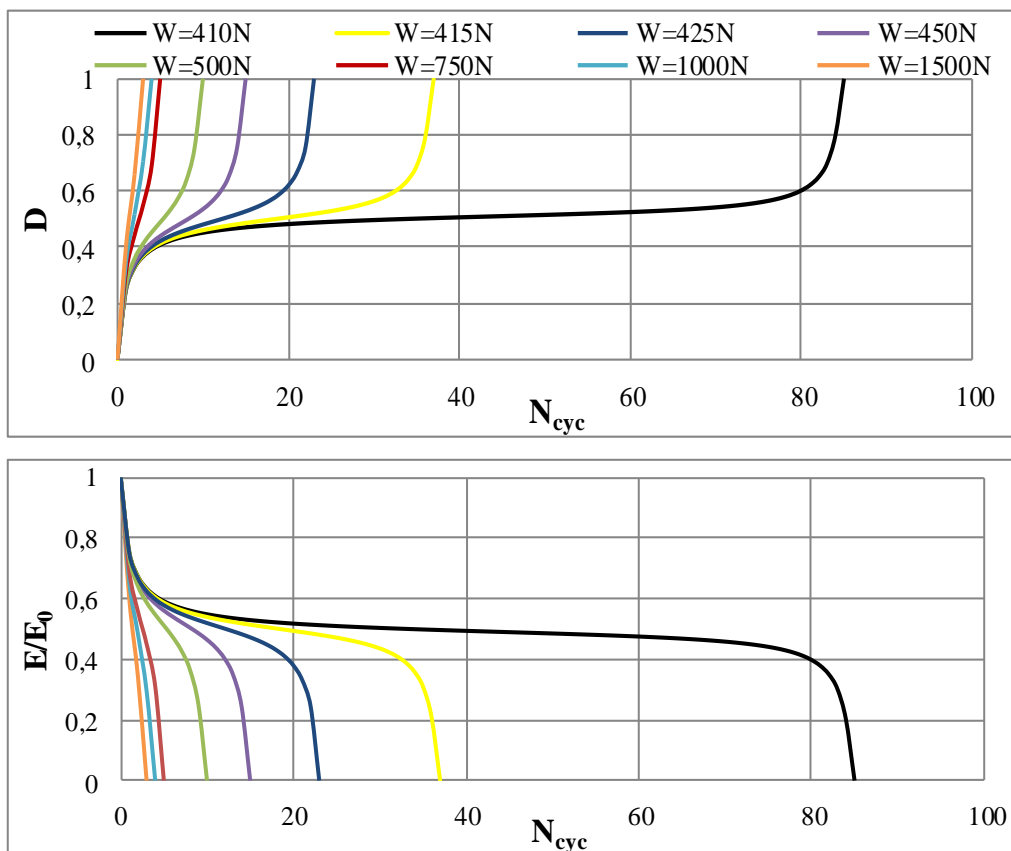


FIG. 4.4 – Evolution de l'endommagement et de la rigidité en fonction du nombre de cycles

- **Influence du coefficient de frottement.** L'influence du coefficient de frottement est étudiée dans cette série de simulations. La durée de vie augmente quand le frottement est de plus en plus faible.

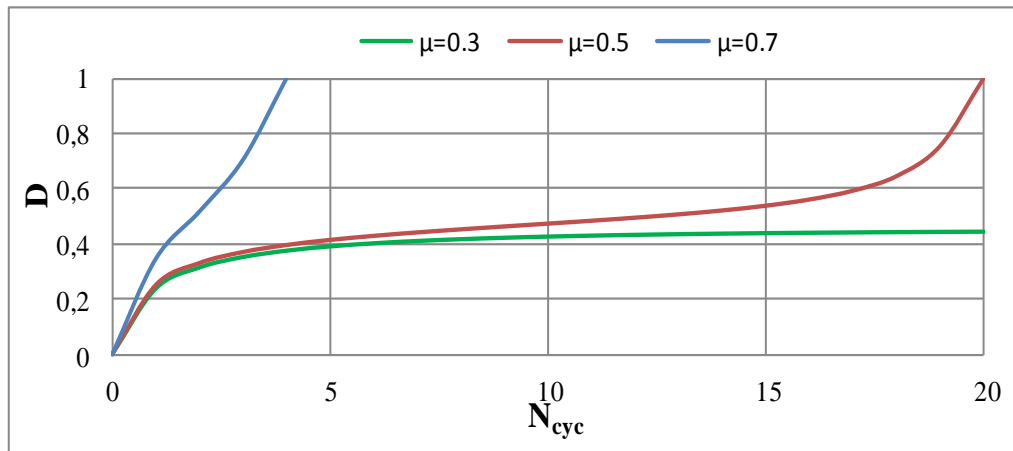


FIG. 4.5 – Evolution de l'endommagement en fonction du nombre de cycles pour différents coefficients de frottement

Références

- [1] L.M. Kachanov, Introduction to continuum damage mechanics, Martinus Nijhoff, 1986.
- [2] Y.N. Rabotnov, Creep problem in structural members, North Holland, Amsterdam, 1969.
- [3] J. Lemaître et J.L. Chaboche, Aspect phénoménologique de la rupture par l'endommagement, J. Mécanique Appliquée, 2, 3, 1978, 317-365.
- [4] J.L. Chaboche, Méthodes de calcul en fatigue à chaud, Ecole d'été sur la Fatigue, Sherbrooke (Québec), 1978.
- [5] J. Lemaître et J. Dufailly, Modélisation et identification de l'endommagement plastique des métaux. 3^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 1977.
- [6] J. Mazars, Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure, Thèse de Doctorat es-sciences physiques de l'université de Paris VI, 1984.