

Modélisation de la fatigue de contact dans les câbles corrodés

Virginie PERIER, Lamine DIENG & Laurent GAILLET

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, division MACOA
Route de Bouaye, 44 380 Bouguenais, France
virginie.perier@lcpc.fr, lamine.dieng@lcpc.fr

Résumé :

Les câbles métalliques des ouvrages d'art sont soumis à deux principales causes de dégradations (la fatigue et la corrosion) qui sont particulièrement néfastes au niveau des zones de contacts. Cette étude sur le comportement des fils d'acier tréfilés d'un câble déjà corrodé à la fatigue de contact comporte un volet expérimental et un volet numérique. Les essais expérimentaux réalisés grâce à un dispositif d'essai particulier montrent que la corrosion a tendance à réduire la durée de vie d'un fil. Ce dispositif d'essais est à la base des modélisations numériques qui représentent le contact entre deux fils sains dans lequel la corrosion a été introduite sous forme d'un troisième corps. Des calculs à la fatigue ont été réalisés à partir des modèles sans corrosion isotropes avec ou sans frottement et du modèle anisotrope, ce dernier permet d'obtenir des résultats numériques qui semblent en accord avec l'expérimental.

Abstract :

Metallic cables of bridges are subject to two main causes of deterioration (fatigue and corrosion) which are particularly harmful in contact areas. This study about the behaviour of corroded wires of drawn steel submitted to contact fatigue contains an experimental part and a numerical part. The experimental tests done thanks to a particular test machine show that corrosion tends to reduce the life of a wire. This test principle served to model numerically the contact between two wholesome wires in which corrosion was introduced as a third body. Fatigue computations were carried out from using the isotropic models with and without friction and using the anisotropic model, this latter gives some results which seem to be in compliance with experimental results.

Mots-clefs :

contact ; corrosion ; fatigue

1 Introduction

Les câbles métalliques sont présents dans de nombreux ouvrages d'art (ponts précontraints, suspendus, à haubans). Les deux principales causes de dégradations identifiées sont : la fatigue et la corrosion (Brevet (2005)). Elles sont particulièrement néfastes dans les zones de contacts (soit entre fils d'un même câble, soit entre le câble et son système d'ancrage ou de déviation).

L'objectif de cette étude est de modéliser tant sur le plan expérimental que numérique, la fatigue de contact des fils d'acier tréfilés d'un câble déjà corrodé.

La corrosion est considérée ici comme un phénomène de surface qui se traduit par une réduction de section, des piqûres, des crevasses mais aussi par la présence en surface de débris qui se forme sous l'effet du fretting.

Dans un premier temps, un modèle du contact entre deux fils sains est abordé. Dans une deuxième partie, la corrosion, considérée comme débris, a été introduite dans le contact entre les deux fils sous la forme d'un troisième corps. Enfin, des études de fatigue à partir des modèles sains ont été réalisées afin de comparer les résultats numériques et expérimentaux.

2 Etude expérimentale du contact entre deux fils

Le dispositif d'essais de fretting-fatigue (FIG. 1) mis en place pour reproduire les conditions de sollicitations des fils de câbles à haubans est constitué d'un fil d'acier tréfilé que l'on soumet à un chargement de fatigue en traction ondulée avec une contrainte moyenne de 600 MPa, soit environ 30% de la contrainte à rupture d'un fil (1 860 MPa), et une amplitude de variation de contraintes $\Delta\sigma$. Ce fil est également soumis à des actions de contact en petits débattements puisqu'il est en contact avec quatre patins maintenus dans une pince perpendiculairement au fil. Ces patins sont issus du même fil que l'échantillon soumis à l'essai. La force de contact $2F_c$ appliquée sur la pince est de 400 N. Ce dispositif d'essai a été développé par Siegert (1997) pour étudier les effets de la fatigue de contact sur un fil d'acier tréfilé. Il a ensuite été utilisé par Urvoy *et al.* (2005) pour évaluer l'effet de la galvanisation et de la lubrification sur le comportement en fretting-fatigue d'un fil. L'objet de cette étude est d'analyser l'influence de la corrosion sur la tenue à la fatigue de contact des fils d'acier tréfilé.

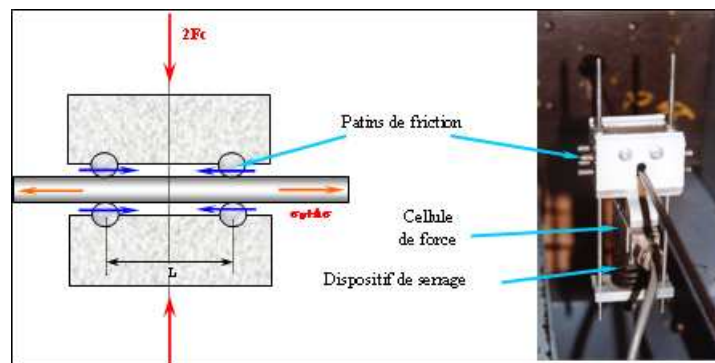


FIG. 1 – Dispositif d'essai : Banc de fretting-fatigue

Si l'on suppose le système patin-support parfaitement rigide, étant donnée la symétrie du montage, l'amplitude de déplacement relatif entre un patin et le fil s'exprime par la relation :

$$\text{(Urvoy } et al. (2005)) \quad \delta = \frac{\Delta\sigma \cdot L}{4 \cdot E}$$

Où $\Delta\sigma$ est la variation de contrainte de traction, L est la distance entre les patins ($L = 20$ mm dans les essais réalisés pour cette étude) et E désigne le module d'Young.

Des fils d'âme de toron ayant différents états de surface ont été utilisés pour les essais : clair, clair poli et corrodé (environ deux mois à l'extérieur). Pour certains essais, le dispositif a été plongé dans une solution (eau ou solution de chlorures de sodium avec une concentration de 35 g/l de NaCl). Les durées de vie obtenues à chaque essai sont représentées sur la FIG. 2 en comparaison avec la courbe de Wöhler en fretting-fatigue d'un fil clair (Urvoy *et al.* (2005)).

Les essais sur fils précorrodés soumis à $\Delta\sigma = 120$ ou 150 MPa se sont rompus pour un nombre de cycles inférieur à celui obtenu avec des fils clairs. La corrosion a donc tendance à réduire la durée de vie des fils soumis à de la fatigue de contact. Par contre, il est difficile de formuler des conclusions catégoriques quant à l'influence de l'eau ou des chlorures de sodium puisque, pour une même variation de contrainte, ces essais se sont rompus pour des nombres de cycles relativement proches. Par ailleurs, l'essai entre fils précorrodés soumis à $\Delta\sigma = 100$ MPa ne s'est pas rompu et a été arrêté après 6 millions de cycles. La limite d'endurance d'un fil clair en fretting-fatigue est de 100 MPa. On peut donc se demander si la limite d'endurance d'un fil précorrodé est identique. Les deux essais réalisés à partir de fils sains soumis à $\Delta\sigma = 120$ MPa ont été interrompus sans rupture du fil et n'ont pas donné de résultats concluants.

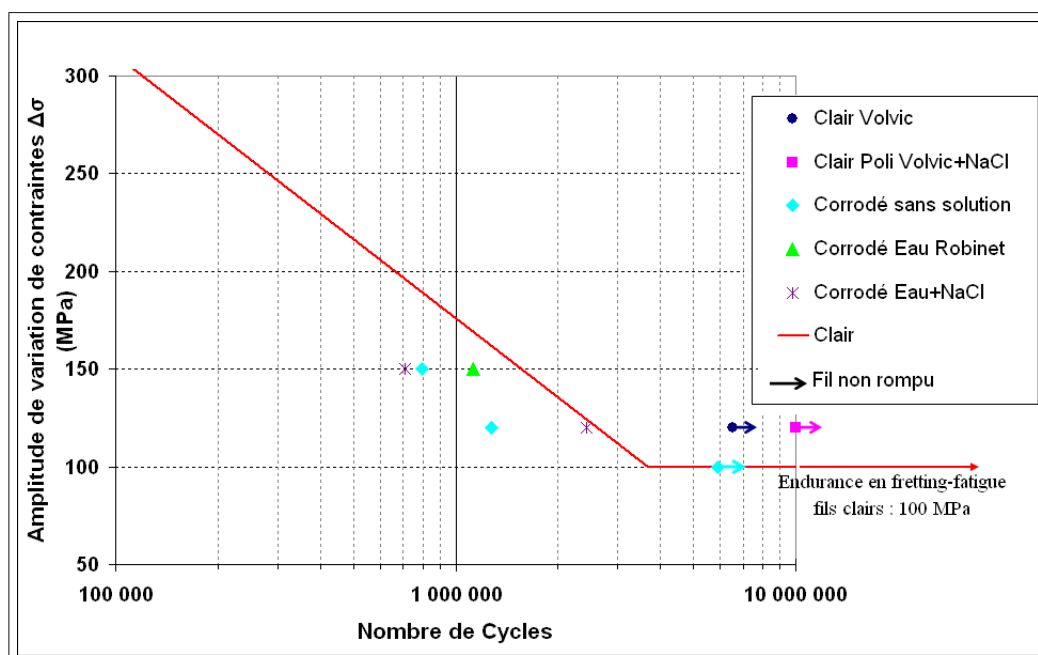


FIG. 2 – Résultats des essais et courbe de Wöhler d'un fil clair en fretting-fatigue

3 Modélisation numérique du contact entre deux fils sains

3.1 Mise en œuvre du modèle 2D du contact entre deux fils sains

Une modélisation numérique du dispositif expérimental a été réalisée sur fils sains et corrodés, en utilisant le logiciel de modélisation par éléments finis MSC.MARC MENTAT.

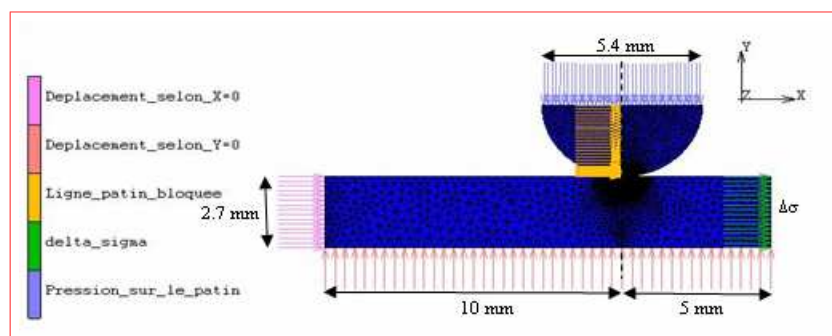


FIG. 3 – Géométrie, maillage et conditions aux limites du modèle 2D

Pour des raisons de symétrie, nous n'avons modélisé qu'un demi-fil et un demi-patin chacun de 2,7 mm de rayon (FIG. 3). Le patin et le fil ont été maillés à l'aide d'éléments triangulaires à trois nœuds, et ce maillage est de plus en plus fin au fur et à mesure que l'on se rapproche de la zone de contact : on passe de 400 microns à l'extérieur du contact puis à 30 μm et à 2 μm sous le contact.

Une force de 200 N ($= F_c$) a été appliquée sur le patin sous la forme d'une pression linéique de 37 MPa. Le fil a été soumis à une traction initiale de 600 MPa, et à son extrémité droite, la contrainte varie de $\pm\Delta\sigma/2$ MPa. Les caractéristiques (E : module d'Young, ν : coefficient de Poisson, σ_y : limite élastique, σ_r : contrainte à rupture) du fil d'acier tréfilé sont rappelées dans le TAB. 1.

E (MPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_r (MPa)
210 000	0,3	1 720	1 860

TAB. 1 – Caractéristiques mécaniques d'un fil d'acier tréfilé

3.2 Quelques résultats du modèle 2D sain

Les études précédentes ont montré que les composantes de cisaillement du tenseur des contraintes et la pression hydrostatique jouent un rôle prédominant dans le comportement à la fatigue. C'est pourquoi nous avons observé ces deux composantes des contraintes de Cauchy (FIG. 5). On voit que les contraintes de cisaillement "shear stress" sont maximales sur les bords du contact tandis que la pression hydrostatique est maximale en valeur absolue sous le centre du contact.

4 Introduction d'un troisième corps dans le contact

La corrosion au niveau des contacts est modélisée en introduisant un troisième corps dans le modèle du contact entre deux fils sains. Différentes approches ont été employées pour essayer de modéliser ce phénomène. Cependant, l'étude bibliographique que nous avons menée ne nous a pas informé sur les propriétés mécaniques de l'acier corrodé, ni sur les caractéristiques de la corrosion seule. C'est pourquoi dans les différents modèles qui vont suivre, les valeurs choisies ne correspondent pas à des données expérimentales. Il s'agit d'une première étape de la démarche au cours de laquelle on s'attachera davantage à l'aspect qualitatif des résultats qu'à leur aspect quantitatif.

4.1 Présentation des différents modèles

Une première idée a consisté à introduire des ressorts dans la zone de contact pour simuler la modification de la rigidité de la surface liée à la corrosion (FIG. 4(a)). On a attribué une rigidité arbitraire de 10 kN/m à ces ressorts. Dans un second temps, on a introduit une couche d'éléments entre le patin et le fil (FIG. 4(b)) pour représenter une couche compacte de corrosion. Cette couche de trois microns d'épaisseur a été maillée à l'aide d'éléments triangulaires à trois nœuds et a un module d'Young plus faible ($E = 150\,000$ MPa) que l'acier tréfilé. Une dernière idée a consisté à introduire des billes de contact entre les deux corps pour matérialiser des particules discrètes de corrosion (FIG. 4(c)) qui se seraient détachées des fils tout en restant dans le contact. Dans ce modèle, nous avons simplifié le problème en négligeant la perte de matière engendrée par le détachement des particules, et en ne représentant que l'état dans lequel les particules d'oxydes sont déjà établies dans le contact.

Les billes de contact ont également été maillées à l'aide d'éléments triangulaires (70 éléments par bille). Leur diamètre est de $2\ \mu\text{m}$. Pour qu'elles puissent reprendre les contraintes élevées dues au contact avec le fil et le patin, elles ont été rendues quasi-incompressibles en leur attribuant un module de compressibilité K élevé :

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2\nu)} \simeq 1,7 \cdot 10^6 \text{ MPa}$$

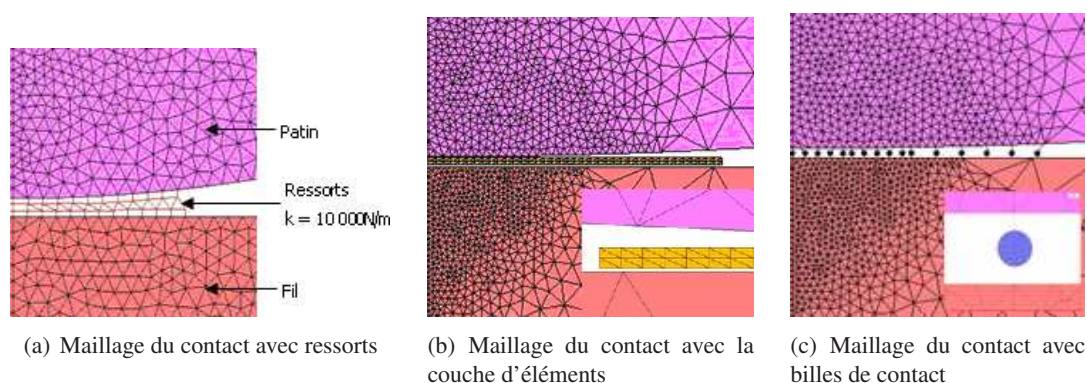


FIG. 4 – Modèles avec troisième corps

4.2 Etude comparative des différents modèles

Afin de comparer les différents modèles, on a représenté les contraintes de cisaillement et la pression hydrostatique pour chaque modèle avec la même échelle d'isovaleurs.

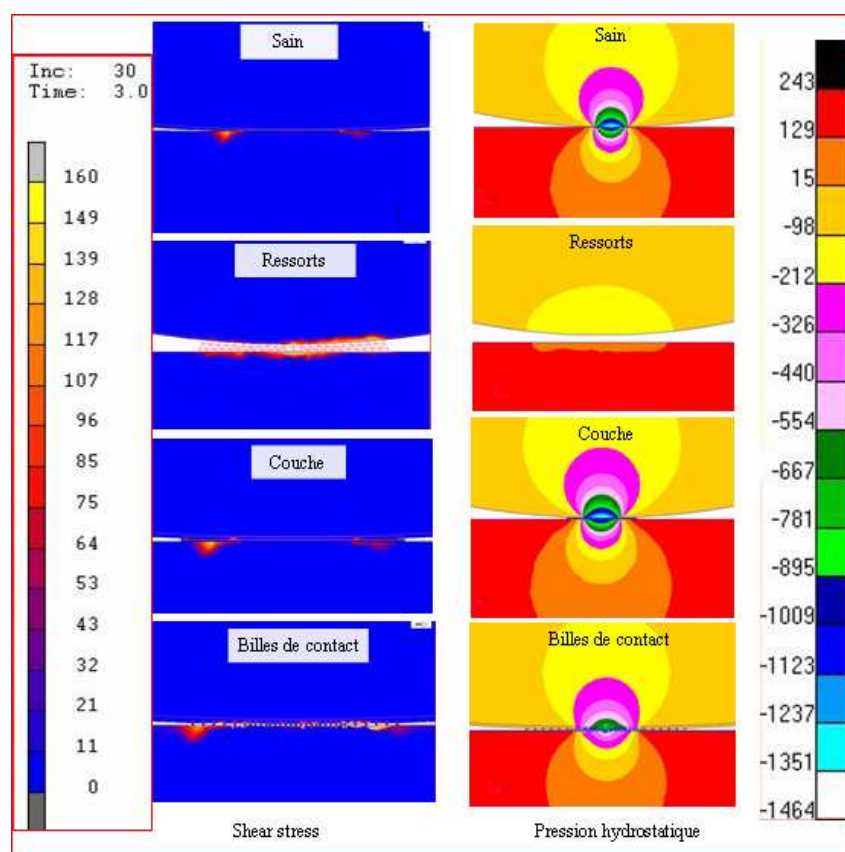


FIG. 5 – Contraintes de cisaillement et pression hydrostatique des différents modèles

Lorsque l'on regarde l'allure générale de ces contraintes des différents modèles (FIG. 5), il apparaît que, pour le modèle avec les ressorts, les contraintes sont étendues sur toute la zone de ressorts et on a constaté que la position des contraintes dépendaient de la longueur de la zone de ressorts, ce qui ne nous paraît pas réaliste au premier abord, c'est pourquoi nous avons choisi d'abandonner ce modèle. Les autres modèles donnent des résultats assez proches. En effet, pour chaque modèle on voit que les contraintes de cisaillement sont maximales sur les

bords du contact tandis que la pression hydrostatique est maximale en valeur absolue sous le centre du contact. Néanmoins, on constate que le modèle avec les billes de contact présentent de fortes singularités au niveau de chacune des sphères, cela est dû au caractère discret de ces dernières. De plus, la zone de sphères s'étend sur toute la longueur du contact et au-delà, on voit donc que la position des contraintes ne dépend pas de la longueur de la zone de sphères.

5 Analyses de fatigue

5.1 Analyse de fatigue uniaxiale

La durée de vie d'un fil sain obtenue à l'aide du logiciel *MSC.FATIGUE* en utilisant un critère de type Von Mises est représenté sur la FIG. 6

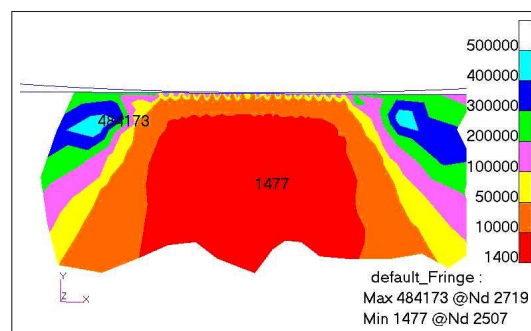


FIG. 6 – Durée de vie (en cycles) de la zone de contact

Avec ce critère, on constate que la durée de vie maximale du fil se trouve sur les bords du contact alors que la durée de vie minimale se trouve sous le contact (rouge). Ces résultats ne sont pas représentatifs puisque les essais expérimentaux montrent que les fissures apparaissent sur les bords du contact, d'où l'idée d'utiliser d'autres critères de fatigue de type multiaxial comme les critères de Crossland, Gerber ou Dang Van (Lemaitre *et al.* (2001), Weber (1999)). L'avantage de ces critères est qu'ils décomposent le tenseur des contraintes en une partie déviatorique et une partie hydrostatique.

5.2 Analyse de fatigue multiaxiale

On souhaite effectuer une analyse multiaxiale utilisant le critère de Dang Van. Ce critère s'écrit :

$$\max_t [\tau(t) + \alpha \cdot Ph(t)] \leq \beta$$

où :

- $\tau(t)$ est la cission instantanée maximale associée à la contrainte mésoscopique adaptée ;
- $Ph(t)$: pression hydrostatique ;
- α et β sont des caractéristiques qui peuvent être identifiées à partir des limites d'endurance en flexion alternée (σ_D) et en torsion alternée (t).

Le logiciel permet alors de déterminer les zones fragiles en affichant le coefficient de sûreté ("Safety Factor"), calculé via la formule suivante :

$$\text{Safety Factor} = \frac{1}{\max \frac{\tau(t)}{\beta - \alpha \cdot Ph(t)}}$$

Lorsque ce coefficient est inférieur à 1, la limite de fatigue est atteinte et le critère prévoit la rupture de la structure, sinon, lorsque ce coefficient est supérieur à 1, il n'y a pas de rupture par

fatigue.

On a tout d'abord réalisé une analyse de fatigue à partir du modèle sain isotrope et sans frottement, et nous avons constaté que la zone fragile se situe au cœur du fil sous le centre du contact (FIG. 7), ce qui est contradictoire avec les résultats expérimentaux qui montrent que les fissures apparaissent sur les bords du contact.

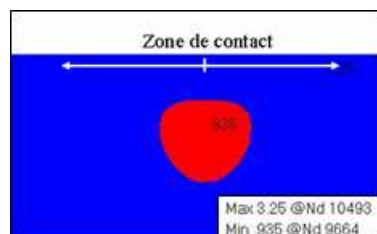


FIG. 7 – Analyse de fatigue multiaxiale du modèle isotrope sans frottement

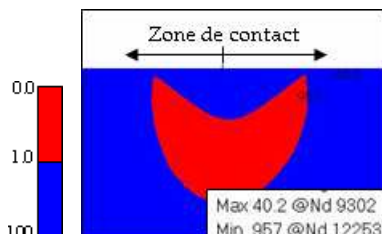


FIG. 8 – Analyse de fatigue multiaxiale du modèle anisotrope



FIG. 9 – Rupture de l'essai avec fils pré-corrodés plongés dans de l'eau

L'analyse de fatigue à partir du modèle isotrope avec frottement ($\mu = 0,3$) a montré que le frottement ne semble pas jouer un rôle prépondérant dans les résultats. Or l'acier tréfilé a un comportement anisotrope : en effet, le tréfilage de l'acier se traduit par un allongement des grains de perlite dans le sens longitudinal ce qui permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques dans ce sens. Cependant, les propriétés radiales de l'acier tréfilé ne sont pas bien connues, c'est pourquoi nous avons arbitrairement choisi d'appliquer une loi élastoplastique avec des caractéristiques mécaniques plus faibles que dans le sens longitudinal :

- Module d'Young : $E_r = 200\,000\text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,1$
- Limite d'élasticité : $\sigma_y = 1\,350\text{ MPa}$

Les résultats obtenus à partir du modèle anisotrope sont en accord avec l'expérimental (FIG. 8 et FIG. 9). En effet, la zone fragile se situe toujours sous le centre du contact légèrement sous la surface du fil mais elle remonte sur les bords du contact où vont donc apparaître les fissures. On peut voir cette concordance sur la FIG. 9 qui représente la zone de contact où sont apparues les fissures à l'origine de la rupture de l'essai entre deux fils précorrodés plongés dans de l'eau : on voit que deux fissures se sont propagées de chaque côté de la zone de contact, que cette zone s'est presque détachée du reste du fil, et l'épaisseur de celle-ci rappelle la forme des fonds de fissures obtenus avec l'analyse à la fatigue à partir du modèle anisotrope.

6 Conclusions

La modélisation numérique de la fatigue de contact permet notamment d'étudier l'état de contraintes dans le fil et de connaître les phénomènes qui ont lieu dans le fil. Les résultats obtenus à partir du modèle anisotrope montrent que la zone fragile se trouve sous le centre du contact légèrement en profondeur et remonte en surface sur les bords du contact, ce qui est en accord avec les essais de fretting-fatigue menés à l'aide du dispositif expérimental pouvant reproduire les conditions de sollicitation des câbles de haubans. La corrosion a été introduite qualitativement dans le modèle isotrope sous la forme d'un troisième corps. Ce troisième corps a été représenté par des ressorts, puis par une couche d'éléments et par des billes de contact, ces

deux derniers modèles paraissent les plus représentatifs des cas observés. Cependant, afin de comparer les résultats numériques et expérimentaux, l'anisotropie sera introduite dans les différents modèles, ce qui nécessitera également l'étude du comportement radial de l'acier tréfilé. Par ailleurs, il est aussi envisagé d'étudier l'influence des caractéristiques du troisième corps sur l'état de contrainte dans le fil.

Références

- Brevet P. 2005 Pathologie des haubans et câbles : fatigue-corrosion. *Journée "CABLES 2005"*
- Brevet P. 2006 Mécanismes de fatigue de contact dans les câbles - Analyse de paramètres modifiant l'état de surface des fils et les modèles ou mécanismes de fatigue
- Delclos A. 2000 Comportement élastoplastique du contact entre fils d'un câble. *Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Mécanique, Thermique et Génie Civil de Nantes*
- Lemaitre J., Chaboche J.L. 2001 Mécanique des matériaux solides. *Edition DUNOD*
- Siegert D. 1997 Mécanismes de fatigue de contact dans les câbles de haubanage du Génie Civil. *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes*
- Urvoy J.R., Siegert D., Dieng L., Brevet P. 2005 Influence des revêtements métalliques et des lubrifiants sur la fatigue des contacts interfilaire de câbles. *17ème Congrès Français Mécanique, Troyes*
- Weber B. 1999 Fatigue multiaxiale des structures industrielles sous chargement quelconque. *Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de Lyon*