



Comportement en rupture en mécanique des contacts sous chargement de fretting-fatigue: une analyse numérique

Fracture behavior in contact mechanics under fretting-fatigue loading: a numerical analysis

Ali Benhamena ^{a,*}, A Baltach ^a, Khelil Foudil ^a, Fatima Benaoum ^a, A Draï ^b, A Moulgada ^c

^a Université Mustapha Stambouli de Mascara, LPQ3M, BP 763, route de Mamounia, Algérie

^b Université Mustapha Stambouli de Mascara, Département de génie mécanique, BP 763, route de Mamounia, Algérie

^c Département de génie mécanique, Université Ibn Khaldoun 14000, Université de Tiaret, Algérie

ARTICLE INFO

Article history :

Received 20 June 20

Received in revised form 04 October 20

Accepted 05 October 20

Keywords:

Fretting-Fatigue ; Friction; Contact mechanics ; Stick ; Slip ; Stick-slip ; Finite element analysis; Crack. SIF.

Mots clés:

Fretting-Fatigue ; Frottement ; Mécanique de contact ; Adhérence ; Glissement ; Adhérence-Glissement ; éléments finis ; Fissure ; FIC.

ABSTRACT

The main objective of this work is to analyze the contact pressure and the shear stress on the contact area under fretting-fatigue loading. The nonlinear finite element method, based on the calculation of normal and shear stresses, was used to analyze the crack initiation in the contact zone. The effect of shear force on the distribution of normal and shear stresses has been highlighted. A multiaxial fatigue criterion is used to locate the position of crack initiation in the contact zone. the application of fracture mechanics based on the determination of the stress intensity factor SIF to study the fracture behavior of titanium alloys. A good correlation was found between the FEM simulations and the analytical results.

RÉSUMÉ

L'objectif principal de ce travail est d'analyser la pression de contact et la contrainte de cisaillement dans la zone de contact sous sollicitation de fretting-fatigue. La méthode des éléments finis non linéaires, basée sur le calcul des contraintes normales et de cisaillement ont été utilisée pour analyser l'initiation de la fissure dans la zone de contact. L'effet de la force de cisaillement sur la distribution des contraintes normales et de cisaillement ont été mis en évidence. Un critère de fatigue multiaxiale est utilisé pour localiser le lieu d'amorçage de la fissure dans la zone de contact. l'application de la mécanique de la rupture basée sur la détermination du facteur d'intensité de contrainte FIC pour étudier le comportement en rupture de l'alliage de titane. Une bonne corrélation a été trouvée entre les simulations FEM et les résultats analytiques.

1 Introduction

Le fretting est un endommagement critique dans tous les éléments assemblés utilisés dans l'industrie, et notamment dans l'industrie aéronautique [1-2]. Il est important de bien connaître les modes d'endommagement associés pour pouvoir prédire correctement les durées de vie des pièces. Le fretting est une sollicitation de contact caractérisée par des microdéplacements alternés qui génèrent de l'usure et de la fissuration [3-5]. Selon la littérature dans un moteur, une réduction de 20 % de frottement conduit à un gain de 7% de carburant ; alors sur le plan économique c'est une perte importante d'énergie. Zebbar et al. [6] ont étudié l'effet du micro film de lubrification dans la jonction segment-chemise

* Corresponding author. Tel.: +273 771 18 03 36.

E-mail address: ali.benhamena@univ-mascara.dz

d'un moteur à combustion interne. Ils ont montré que la fréquence des oscillations de l'anneau dans la direction radiale dépend principalement de la rigidité de l'anneau qui dépend à son tour du matériau de l'anneau et des paramètres géométriques. Ils ont conclu aussi que l'oscillation radiale de l'anneau provoque une source d'usure des deux surfaces d'appui de la gorge de piston ; c'est le phénomène de fretting. Le fretting est étudié par Warlow-Davies [7] et McDowell [8] qui montrent l'effet néfaste d'un contact oscillatoire sur des structures testées en fretting-fatigue. Des lors, les recherches s'accroissent et un large travail expérimental est effectué sur les dégradations de fretting [9], permettant de mettre en évidence l'influence d'un grand nombre de facteurs parmi lesquels : l'amplitude du déplacement relatif des surfaces en contact, la pression de contact, le coefficient de frottement et la différence de propriétés élastiques des solides en contact, etc. Pour une configuration plan-plan Nakasawa [10], indique que la position du site d'amorçage évolue en fonction de la condition de glissement (slip). Pour des efforts de contacts importants et des domaines de glissement faibles (microslip), le site d'amorçage se situe en bordure du contact. Buckley [12] considère que l'amorçage se produit en bordure de contact, là où les contraintes de traction sont les plus élevées. Il se produit une déformation plastique locale caractérisée par le cisaillement de bande de glissement. Kuno [15] observe que le site d'amorçage positionne au centre de la zone de glissement (slip) ou même à la frontière avec la zone d'adhérence (stick). En plus l'effet de la pression de contact et le glissement à l'interface des surfaces de contact, le coefficient de frottement ainsi la contrainte de friction dans la zone de contact ne sont pas pleinement compris et représentent un domaine de recherche très actif. La présente étude examine le comportement en fretting-fatigue des alliages de titane (Ti-6Al-4V). Ce matériau est largement utilisé dans l'aérospatiale et l'industrie biomédicale en raison de ses propriétés mécaniques supérieures et que leur densité est relativement faible. Dans le présent travail, plusieurs études ont été effectuées afin de caractériser l'effet des différents paramètres sur le comportement en fretting-fatigue numériquement d'une configuration de contact cylindre/plan. Les facteurs importants tels que la pression de contact, la force tangentielle et le chargement cyclique sont discutés. Les critères de fatigue multiaxiaux (Crossland) ont été utilisés pour prédire correctement le lieu d'amorçage de fissure dans la zone de contact.

2 Modèle élément finis

Les essais de fretting peuvent être effectués en régime de glissement partiel selon Hills et al. [11]. Ce dernier a montré qu'il est très difficile de réaliser une expérience bien contrôlée avec un actionneur externe en raison des faibles amplitudes de déplacement à l'interface des surfaces de contacts.

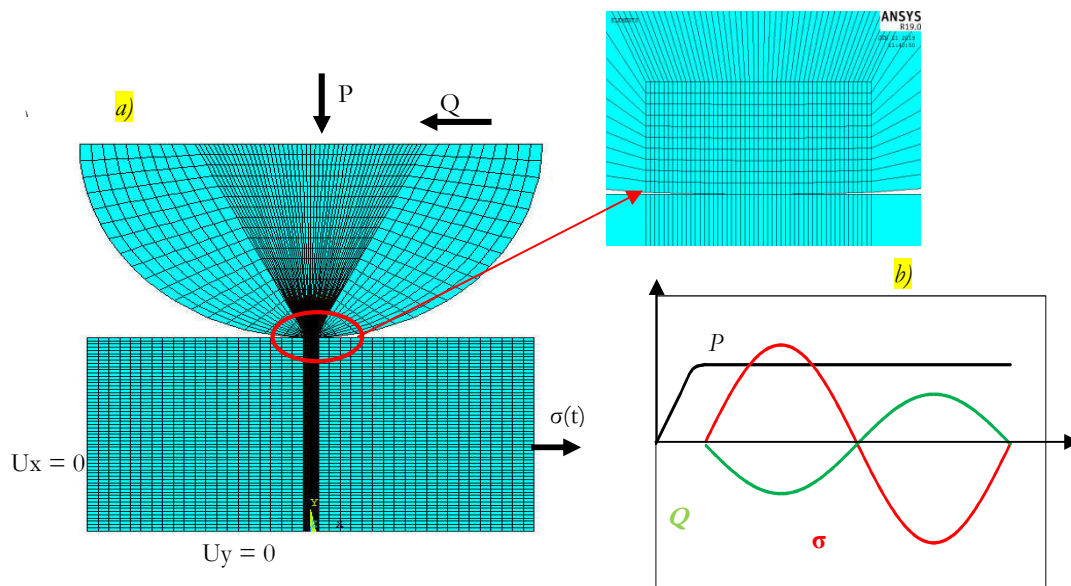


Fig. 1 – (a) Modèle éléments finis du contact cylindrique/plan, (b) Condition de chargement

L'analyse par éléments finis (AEF) est un outil important pour la conception d'une composante mécanique. Selon les dimensions de l'éprouvette et du pad, un modèle en deux dimensions a été généré en utilisant le logiciel commercial ANSYS® (ANSYS v19.0) pour analyser le champ de déplacement, de déformation et de contrainte dans la zone de contact. Un élément solide bidimensionnel (PLANE182) est utilisé pour la modélisation du cylindre/plan. Cet élément est défini par quatre nœuds ayant chacun deux degrés de liberté. De plus, un élément de contact surface-à-surface (CONTAC171) et d'élément de surface cible (TARGE169) sont utilisés pour simuler numériquement les problèmes de contact. Le frottement entre les surfaces de contact est modélisé à l'aide du modèle de Coulomb. Le modèle optimisé comprend 116121 nœuds et 101802 éléments (figure 1-a).

Une analyse non linéaire en deux étapes a été réalisée, afin de simuler numériquement l'essai de fretting. Dans la première étape, une pression de contact P est appliquée sur le pad (cylindre). Cette phase représente la jonction du cylindre (pad) sur le plan (éprouvette) ; après en deuxième étape, la charge tangentielle Q et le chargement cyclique σ sont appliquées sur le pad et l'éprouvette, respectivement. La figure 1-b illustre l'historique de chargement (P , Q et σ). Les paramètres géométriques utilisés dans cette étude sont : le rayon du pad $R = 30$ mm et pour l'éprouvette : longueur $L = 60$ mm, largeur $w = 30$ mm et d'épaisseur $t = 1$ mm. Le matériau utilisé dans cette étude est un alliage de titane Ti-6Al-4V caractérisé par Mohd Tobi et al. [13]. Les propriétés élastiques sont : module de Young, $E = 116$ GPa et coefficient de Poisson, $\nu = 0,34$. Le coefficient de frottement est pris $\mu = 0.8$ [14].

3 Résultats et discussions

3.1 Validation du modèle élément finis

La simulation de l'essai de fretting-fatigue par éléments finis est effectuée en deux dimensions (2-D MEF), un calcul statique avec un coefficient de frottement nul est adopté dans le but d'être en accord avec la théorie de Hertz [15]. Dans le cas de l'étude de fretting, le rayon du pad, R , la charge normale, P et l'épaisseur de l'éprouvette ont été définis. Selon Hertz, la distribution de la pression de contact le long de la ligne de contact est exprimée par :

$$P(x) = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (1)$$

où p_0 est la pression maximale

$$p_0 = \frac{2P}{\pi a} \quad (2)$$

et a est la demi-largeur de contact

$$a = \left(\frac{4PR}{\pi E^*}\right)^{0.5} \quad (3)$$

avec

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)^{-1} \quad (4)$$

et

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)^{-1} \quad (5)$$

Selon Cattaneo [17] et Mindlin [18], la distribution du cisaillement pour une condition de fretting-fatigue est exprimée par la relation suivante :

$$q(x) = \mu P_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} + q'(x) \tag{6}$$

avec

$$\frac{q'(x)}{\mu P_0} = \begin{cases} 0 & \text{si } c \leq |x| < a \\ \frac{c}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{c}\right)^2} & \text{si } |x| < c \end{cases} \tag{7}$$

On rappelle que la demie-largeur de la zone d'adhérence (stick) est exprimée en fonction de la pression de contact, contrainte tangentielle et le coefficient de frottement par la relation :

$$\frac{c}{a} = \sqrt{1 - \left(\frac{Q}{\mu P}\right)^2} \tag{8}$$

La distribution des champs de pression de contact et la contrainte tangentielle est présentée sur la figure 2. L'évolution de ces quantités mécanique (pression de contact et contrainte tangentielle) le long de la zone de contact est comparée à la solution analytique de Jonhson [15].

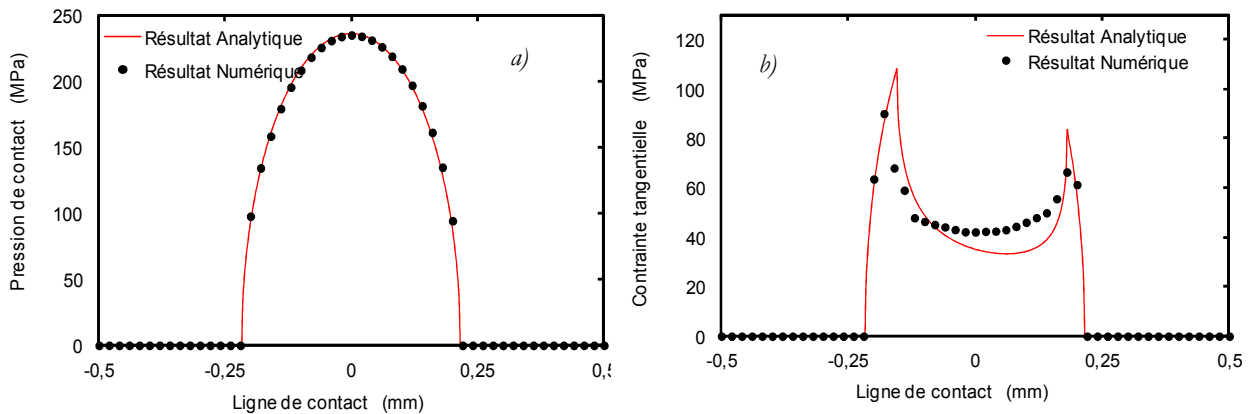


Fig. 2 – Comparaison des paramètres de contact calculé analytiquement et numériquement : (a) distribution de la pression de contact ; (b) contrainte tangentielle le long de la zone de contact.

Les résultats sont très cohérents sur la largeur de contact mais en revanche un léger écart est observé en termes de contrainte tangentielle. Elle est de l'ordre de 5 % en calcul analytique. Ces résultats sont obtenus pour une taille des éléments de maillage de 5 µm dans la zone de contact. On se limite ici à ce niveau de raffinement du maillage pour la suite des analyses numériques. Il est observé aussi sur la figure 2 le long de la zone de contact que les valeurs de la contrainte de friction sont nulles à l'extérieur de la zone de contact, puis augmente significativement pour atteignent leurs maximums au bord de la zone de contact puis diminué pour atteindre son minimum au milieu de la zone contact. Dans un problème de contact, on peut expliquer ce phénomène que la zone de contact en fretting-fatigue est divisée en deux zones : zone d'adhérence (Stick) et une zone de glissement (Slip). Le régime qui correspond à la fissuration d'un essai de fretting fatigue est le régime de glissement mixte ; (Stick-Slip). Ces résultats sont en bon accord avec les résultats de Cattaneo [17] et Mindlin [18].

Les isovaleurs de la contrainte équivalente de Von Mises et les contraintes de cisaillements sont illustrés dans la figure 3. Nous remarquons que les valeurs les plus élevées de ces contraintes (σ_{VM} et σ_{xy}) seront localisées au bord de la zone de contact, leurs distributions ne sont pas uniformes dans la zone de contact à cause de l'interaction de plusieurs paramètres

(coefficient de frottement, adhérence, glissement, force de friction, concentration de contrainte, champ de contrainte multiaxiale dans la zone de contact, etc.). Cela s'explique par le fait que lors d'un essai de fretting-fatigue la zone de contact est sous sollicitation complexe (traction et compression). Selon ces résultats on peut dire que le risque d'amorçage aura lieu au bord de la zone de contact. Autrement dit, pour une pression de contact très élevée qui conduit à une adhérence importante dans la zone de contact favorise une concentration de contrainte au bord de la zone de contact sous l'action d'un chargement cyclique. Par conséquent la présence de ce gradient de contrainte très élevé à proximité des surfaces de contact en particulier au bord de la zone de contact peut favoriser la formation et la croissance initiale, de petites fissures, dont la propagation ultérieure peut être accélérée par la présence de charges cycliques externes qui conduisent à la rupture finale de l'éprouvette par fretting fatigue. Pour justifier ces conclusions, la prise en compte des critères de fatigue multiaxiaux semble donc nécessaire pour localiser exactement le lieu d'amorçage de fissure dans la zone de contact. C'est ce qui va être fait avec le critère de fatigue multiaxiale de Crossland. Ce dernier (Critère de Crossland) est implanté sous le code MatLAB.

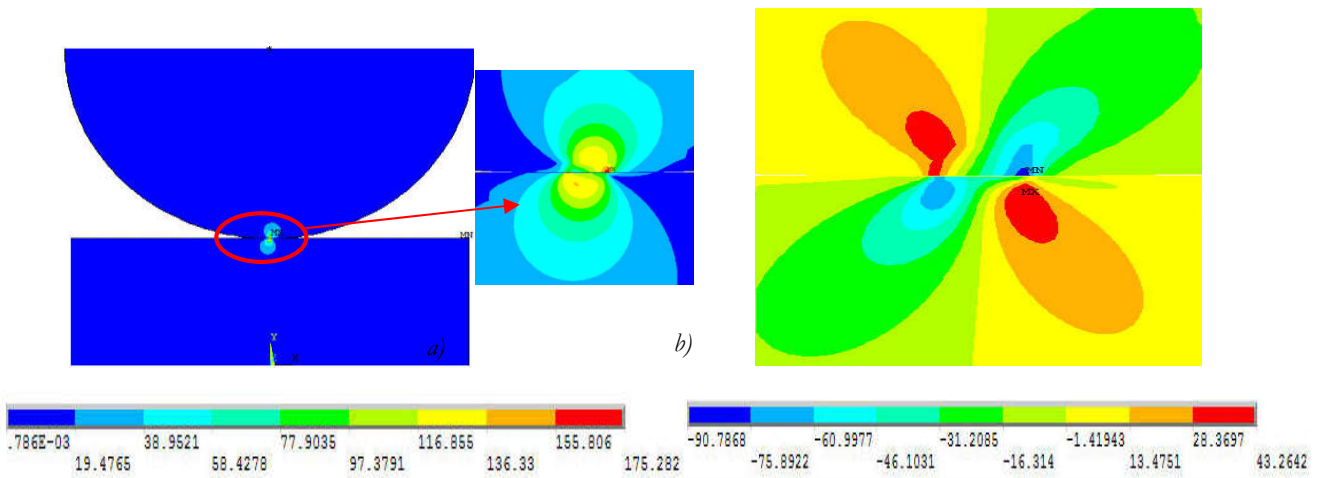


Fig. 3 – Distribution des contraintes : (a) contrainte de Von Mises σ_{vm} ; et (b) contrainte de cisaillement σ_{xy}

3.2 Facteur d'intensité de contrainte FIC

Les critères de fatigue multiaxiaux sont largement acceptés en fatigue comme un outil important utilisé pour prédire le risque d'initiation de la fissure dans une composante mécanique sous sollicitation de fretting-fatigue. Le critère de Crossland [10] est utilisé pour localiser le lieu d'amorçage de fissure dans la zone de contact. Ce critère tient en compte la contrainte hydrostatique maximale et le deuxième invariant du tenseur déviateur de contrainte. L'auteur propose une contrainte équivalente :

$$\sigma_{Cross} = \sqrt{J_{2a}} + B \sigma_{H, max} \tag{9}$$

et le critère s'écrit

$$\sigma_{Cross} \leq A \tag{10}$$

où $\sigma_{H, max}$ est la valeur maximale de la contrainte hydrostatique pendant le cycle de chargement, et $\sqrt{J_{2a}}$ est l'amplitude du deuxième invariant du déviateur de contrainte qui est défini comme:

$$J_2 = \frac{1}{2} . S : S \tag{11}$$

Les deux constantes A et B sont obtenues par calibration du critère sur les deux limites de fatigue. σ_{-1} (limite de fatigue en traction) et τ_{-1} (limite de fatigue en torsion).

La connaissance de la distribution de la contrainte équivalente de Crossland est fondamentale dans la zone de contact pour localiser précisément les lieux d'amorçage des fissures. La figure 4-a illustre la distribution de ce paramètre pour cette condition de chargement. D'après cette figure nous observons que la valeur du paramètre de Crossland est autant plus importante lorsqu'on s'approche à la frontière de la zone de contact à l'interface entre la zone d'adhérence (Stick) et la zone de glissement (Slip). Nous rappelons que le phénomène de fissuration par fretting fatigue intervient dans la phase transitoire adhérence-glissement (Stick-Slip) qui est considérée la phase la plus critique d'après la bibliographie [12, 16, 17, 18, 19].

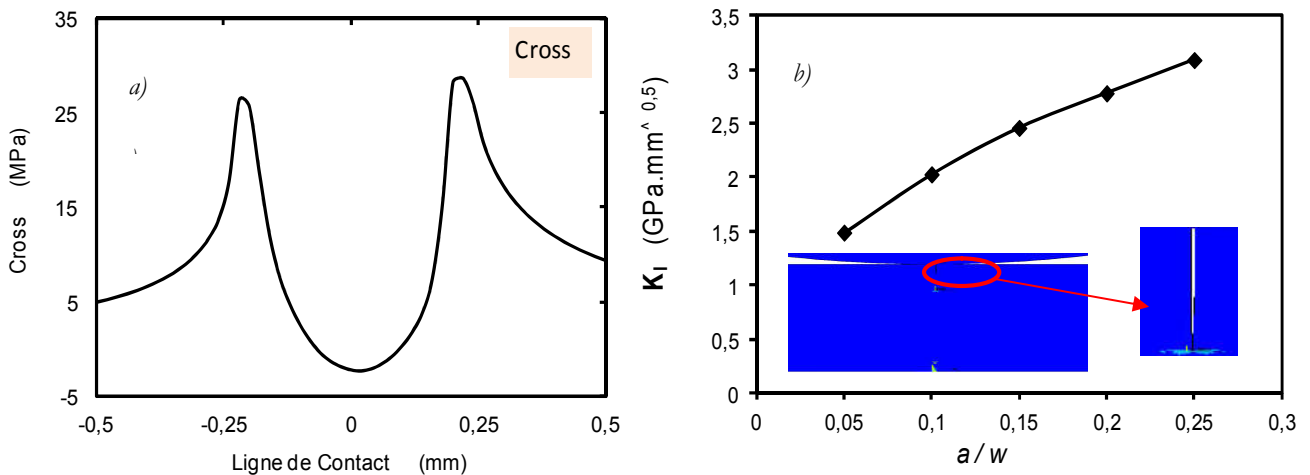


Fig. 4 – (a) Distribution des contraintes de Crossland ; et (b) Facteur d'intensité de Contrainte FIC

Le risque d'amorçage de fissure est plus localisé à l'interface adhérence-glissement dans la zone de contact. L'analyse des champs de contraintes de Von Mises présentée sur la figure 4-b permet d'expliquer le phénomène d'amorçage de fissure. Les contraintes sont maximales à la pointe de la fissure. Dans la Figure 4-b, on présente la variation du facteur d'intensité de contrainte FIC en fonction de la taille de la fissure est déterminée numériquement (voir annexe). On remarque que le facteur d'intensité de contrainte croît progressivement avec le développement de la taille de la fissure. Il convient de noter que le FIC varie linéairement avec une taille de fissure plus grande.

4 Conclusion

Cette étude a été réalisée dans le but d'analyser le comportement mécanique d'une structure sous sollicitation de fretting-fatigue. Les résultats obtenus nous permettent de déduire les conclusions suivantes :

- Développement d'un modèle numérique pour simuler l'essai de fretting-fatigue.
- Une bonne corrélation entre la simulation numérique et les résultats analytiques.
- La taille de la zone de contact (zone d'adhérence et zone de glissement) est reliée à la pression de contact et le niveau de chargement cyclique.
- Le critère de fatigue multiaxiale prédit le lieu d'amorçage de fissure dans la zone de contact.

RÉFÉRENCES

- [1] K. Endo, H. Goto, (1976). Initiation and propagation of fretting fatigue crack, *Wear* 38 pp 311-324.
- [2] J.A. Alic, A.L. Hawley, J.M. Urey, (1979). Formation of fretting fatigue cracks in 7075-T7351 aluminum alloy, *Wear* 56. pp. 351-361.
- [3] Guo R, Duan RC, Mesmacque G, Zhang L, Amrouche A and Guo R. (2008). Fretting fatigue behavior of riveted Al 6XXX components. *Materials Science and Engineering A* (483-484). pp.398-401
- [4] Benhamena A.; Talha A; Benseddiq N.; Amrouche A.; Mesmacque G. and Benguediab M. (2010). Effect of clamping force on fretting fatigue behaviour of bolted assemblies: Case of couple steel-aluminium. *Materials Science and Engineering A* 527: pp. 6413-6421.

- [5] Benhamena A.; Amrouche A.; Talha A; Benseddiq N. (2012). Effect of contact forces on fretting fatigue behaviour of bolted plates: Numerical and experimental analysis. *Tribology International* 48: pp. 237–245.
- [6] Zebbar Dj., Mostefa M, Kherris S, Houzeaux G. (2016). The highlighting of an internal combustion engine piston ring radial oscillations. *Recueil de Mécanique* (01): pp. 7–16.
- [7] Erik P. Meira and Joseph Zeni. (2014). Sports participation following total hip arthroplasty. *Int J Sports Phys Ther.* Nov; 9(6): pp. 839–850
- [8] Henry Gray (1918). *Anatomy of the Human Body.* (<https://www.bartleby.com/107/92.html>)
- [9] Cortez R, Mall S, Calcaterra JR. (2000). Interaction of high cycle and low-cycle fatigue on fretting behavior of Ti-6-4. In Hoepfner DW, Chandrasekaran V, Elliott CB eds. *Fretting fatigue - current technology and practices*, ASTM STP 1367. West Conshohocken: ASTM, pp. 183-98.
- [10] Shea JJ, Lambert RD, McLean TW. (1997). Wear of non-articulation surfaces in modular acetabular cups. In Marlowe DE, Parr JE, Mayor MB eds. *Modularity in orthopedic implants*, ASTM STP 1301. West Conshohocken: ASTM, pp. 60-68.
- [11] Crossland B. (1970). The effect of pressure on the fatigue of metals. In *Mechanical Behaviour of Materials under Pressure*, Pugh H.L.I.D. (ed), Amsterdam : Elsevier, pp. 299-354.
- [12] Hills DA, Nowell D. (1994). *Mechanics of fretting fatigue.* Dordrecht: Kluwer Academic publishers.
- [13] ANSYS v19.0, Ansys Inc. Documentation, ANSYS Elements Reference.
- [14] Mohd Tobi A, Ding J, Bandak G, Leen S, Shipway P. (2009). A study on the interaction between fretting wear and cyclic plasticity for Ti-6Al-4V. *Wear* 267: 270–282.
- [15] T. Dick, C. Paulin, G. Cailletaud, S. Fouvry. (2006). Experimental and numerical analysis of local and global plastic behaviour in fretting wear *Tribology International* Volume 39, Issue 10, pp. 1036-1044.
- [16] Johnson K.L. (1987). *Contact mechanics*, Cambridge university press.
- [17] H. Hertz, On the contact of elastic solids, *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92 (1882) 156–171.
- [18] C. Cattaneo. (1938). Sul contatto di due corpi elastici: distribuzione locale degli sforzi, *Accademia Nazionale. Rend. Accad. Lincei.* 6 (27). 342–348, 434–436, 474–478.
- [19] R.D. Mindlin. ((1949). Compliance of elastic bodies in contact, *ASME Journal of Applied Mechanics* 16. pp. 259–268

Annexe (Méthode de calcul de FIC avec Ansys)

```

SOLVE
FINISH
/OUTPUT
/POST1
ETABLE,SENE,SENE          ! RETRIEVE STRAIN ENERGY PER ELEMENT
ETABLE,VOLU,VOLU          ! RETRIEVE VOLUME PER ELEMENT
C*** IN POST1 DETERMINE KI (STRESS INTENSITY FACTOR) USING KCALC !**
PATH,KII,3,,48            ! DEFINE PATH WITH NAME = "KII"
PPATH,1,1                  ! DEFINE PATH POINTS BY NODE
PPATH,2,406
PPATH,3,162
KCALC,,,1                 ! COMPUTE KI FOR A HALF-MODEL WITH SYMM. B.C.
*GET,KII,KCALC,,K,1       ! GET KI AS PARAMETER KII

```